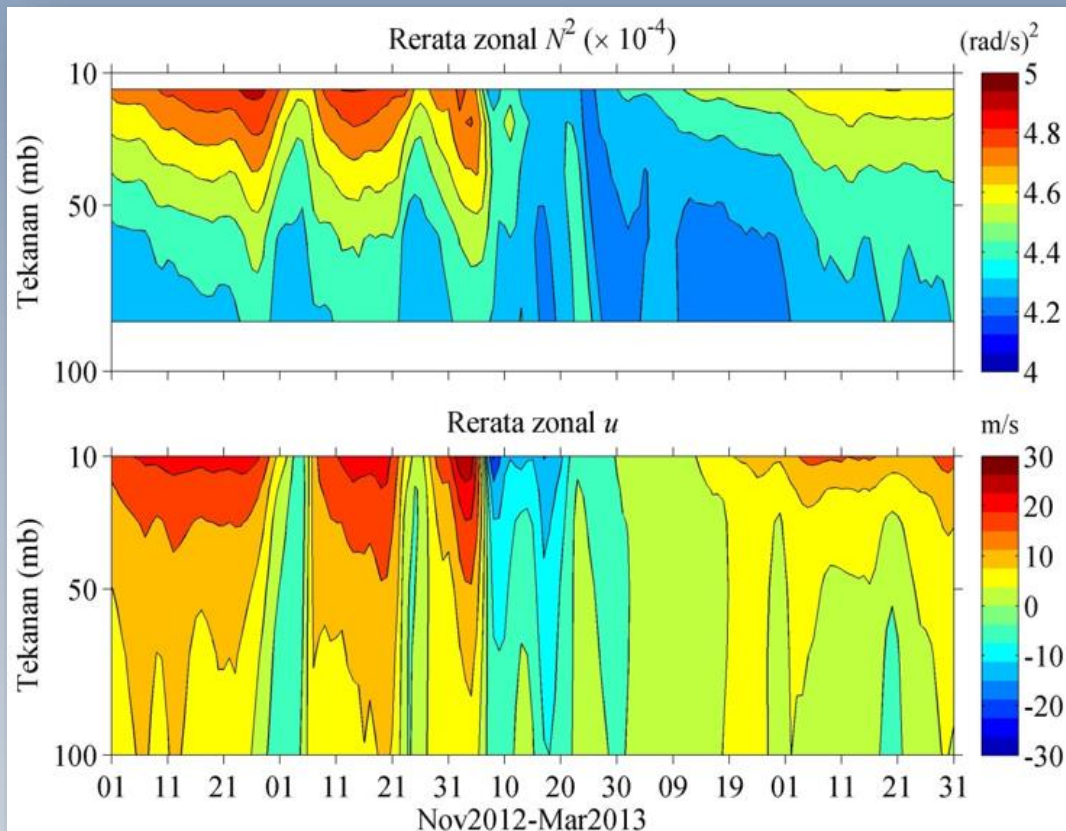


Jurnal **SAINS DIRGANTARA** **Journal of Aerospace Sciences**

Vol. 15 No. 1 Desember 2017 P-ISSN 1412- 808X; E- ISSN 2597-7873

Nomor : 671/AU3/P2MI-LIPI/07/2015



Diterbitkan oleh Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN)
Jakarta – Indonesia

JURNAL **SAINS DIRGANTARA** **Journal of Aerospace Sciences**

Vol. 15 No. 1 Desember 2017

P-ISSN 1412- 808X; E- ISSN 2597-7873

Nomor : 671/AU3/P2MI-LIPI/07/2015

Jurnal Sains Dirgantara (JSD) berisi hasil penelitian, pengembangan, dan/atau pemikiran di bidang sains atmosfer dan antariksa. Jurnal ini terbit sejak tahun 2004 dan dipublikasikan dua kali dalam setahun (Juni dan Desember)

SUSUNAN DEWAN PENYUNTING JURNAL SAINS DIRGANTARA

- Ketua Editor

Dr. Laras Tursilowati, M.Si. (Lingkungan Atmosfer dan Aplikasinya)/LAPAN

- Penyunting

Dr. Trismidianto (Lingkungan Atmosfer dan Aplikasinya)/LAPAN

Dr. Ina Juaeni (Meteorologi/Sains Kebumihan)/LAPAN

Dr. Buldan Muslim (Fisika Magnetosfer dan Ionosfer)/LAPAN

Drs. Jiyo, M.Si (Fisika Magnetosfer dan Ionosfer)/LAPAN

Dr. Wiwiek Setyawati (Lingkungan Atmosfer dan Aplikasinya)/LAPAN

- Mitra Bestari

Prof. Dr. Thomas Djameluddin (Astronomi dan Astrofisik)/LAPAN

Dr. Hakim Luthfi Malasan M.Sc (Astrofisika Bintang dan Instrumentasi Astronomi)/ITB

Dr. Dhani Herdiwijaya (Cuaca Antariksa)/ITB

Dr. Nurjanna Joko Trilaksono (Meteorologi Skala Meso)/ITB

- Korektor Naskah

Dr. Wiwiek Setyawati (Lingkungan Atmosfer dan Aplikasinya)/LAPAN

SUSUNAN SEKRETARIAT REDAKSI JURNAL SAINS DIRGANTARA

Pemimpin Umum

Ir. Christianus Ratrias Dewanto, M.Eng

Pemimpin Redaksi Pelaksana

Ir. Jasyanto, MM

Redaksi Pelaksana

Mega Mardita, S.Sos.,M.Si

Yudho Dewanto, ST

Irianto, S.Kom

Dwi Haryanto, S.kom

Aulia Pradipta, S.S

Tata Letak

M. Luthfi

Berdasarkan SK Kepala LIPI Nomor: 818/E/2015 ditetapkan
Jurnal Sains Dirgantara sebagai Majalah Berkala Ilmiah Terakreditasi

Gambar cover, *Rerata zonal N₂* (panel atas) dan *u* (panel bawah) di lintang 65° - 90°LU

Alamat Penerbit

LAPAN Jl. Pemuda Persil No. 1, Rawamangun, Jakarta 13220

Telepon : (021) 4892802 Ext. 142/146 (Hunting), Fax. : (021) 47882726

Email : publikasi@lapan.go.id

Situs : <http://www.lapan.go.id>

<http://jurnal.lapan.go.id>

JURNAL

SAINS DIRGANTARA

Journal of Aerospace Sciences

Vol. 15 No. 1 Desember 2017

P-ISSN 1412- 808X; E- ISSN 2597-7873

Nomor : 671/AU3/P2MI-LIPI/07/2015

DAFTAR ISI

	Halaman
USIA DAN KEGANDAAN OGLE-LMC 316/317 (THE AGE AND BINARITY OF OGLE-LMC 316/317) Rhorom Priyatikanto	1-12
DINAMIKA LAPISAN STRATOSFER DI BELAHAN BUMI UTARA DAN DAMPAKNYA TERHADAP WILAYAH TROPIS: STUDI KASUS MUSIM DINGIN 2012-2013 (STRATOSPHERIC DYNAMICS IN THE NORTHERN HEMISPHERE AND ITS IMPACT TO THE TROPICS: A CASE STUDY OF 2012-2013 WINTER) Noersomadi	13-24
MODEL BADAI IONOSFER INDONESIA TERKAIT BADAI GEOMAGNET (INDONESIA IONOSPHERIC STORM MODEL RELATED TO GEOMAGNETIC STORM) Anwar Santoso, Mira Juangsih, Sri Ekawati, Iyus Edi Rusnadi, Anton Winarko, Siska Filawati, dan Dadang Nurmali	25-38
ANALISIS KONDISI FLUKS ELEKTRON DI SABUK RADIASI ELEKTRON LUAR BERDASARKAN MEDAN MAGNET ANTARPLANET (BZ) DAN KECEPATAN ANGIN MATAHARI (ANALYSIS OF ELECTRON FLUX CONDITION IN OUTER ELECTRON RADIATION BELT BASED ON INTERPLANETARY MAGNETIC FIELD (BZ) AND SOLAR WIND SPEED) Siska Filawati	39– 50
EFEK CME HALO PENUH PADA IONOSFER LINTANG RENDAH DARI DATA GPS BAKO DI CIBINONG (EFFECT OF FULL HALO CME ON LOW LATITUDE IONOSPHERE FROM BAKO GPS DATA IN CIBINONG) Fakhrizal Muttaqien, Buldan Muslim	51-62

JURNAL

SAINS DIRGANTARA

Journal of Aerospace Sciences

Vol. 15 No. 1 Desember 2017

P-ISSN 1412- 808X; E- ISSN 2597-7873

Nomor : 671/AU3/P2MI-LIPI/07/2015

Dari Redaksi

Sidang Pembaca yang kami hormati,

Puji syukur kita panjatkan ke hadirat Allah SWT, atas rahmat dan karunia-Nya, sehingga Jurnal Sains Dirgantara Vol. 15, No. 1, Desember 2017, hadir ke hadapan sidang pembaca dengan menyetengahkan 5 (lima) artikel sebagai berikut:

"USIA DAN KEGANDAAN OGLE-LMC 316/317 (THE AGE AND BINARITY OF OGLE-LMC 316/317)" ditulis oleh: Rhorom Priyatikanto; "DINAMIKA LAPISAN STRATOSFER DI BELAHAN BUMI UTARA DAN DAMPAKNYA TERHADAP WILAYAH TROPIS: STUDI KASUS MUSIM DINGIN 2012-2013 (STRATOSPHERIC DYNAMICS IN THE NORTHERN HEMISPHERE AND ITS IMPACT TO THE TROPICS: A CASE STUDY OF 2012-2013 WINTER)" ditulis oleh: Noersomadi; "MODEL BADAI IONOSFER INDONESIA TERKAIT BADAI GEOMAGNET (INDONESIA IONOSPHERIC STORM MODEL RELATED TO GEOMAGNETIC STORM)" ditulis oleh: Anwar Santoso, Mira Juangsih, Sri Ekawati, Iyus Edi Rusnadi, Anton Winarko, Siska Filawati, dan Dadang Nurmali; "ANALISIS KONDISI FLUKS ELEKTRON DI SABUK RADIASI ELEKTRON LUAR BERDASARKAN MEDAN MAGNET ANTARPLANET (BZ) DAN KECEPATAN ANGIN MATAHARI (ANALYSIS OF ELECTRON FLUX CONDITION IN OUTER ELECTRON RADIATION BELT BASED ON INTERPLANETARY MAGNETIC FIELD (BZ) AND SOLAR WIND SPEED)" ditulis oleh: Siska Filawati; Artikel terakhir "EFEK CME HALO PENUH PADA IONOSFER LINTANG RENDAH DARI DATA GPS BAKO DI CIBINONG (EFFECT OF FULL HALO CME ON LOW LATITUDE IONOSPHERE FROM BAKO GPS DATA IN CIBINONG)" ditulis oleh: Fakhrizal Muttaqien, Buldan Muslim.

Kami mengundang sidang pembaca yang budiman untuk berpartisipasi aktif dengan mengirimkan karya tulis ilmiah yang sesuai dengan lingkup jurnal ini.

Demikian kami sampaikan, semoga sidang pembaca dapat mengambil manfaatnya.

Jakarta, Desember 2017

USIA DAN KEGANDAAN OGLE-LMC 316/317 (THE AGE AND BINARITY OF OGLE-LMC 316/317)

Rhorom Priyatikanto

Pusat Sains Antariksa

Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional

Jl. Dr. Djundjunan no. 133 Bandung 40173

e-mail: rhorom.priyatikanto@lapan.go.id

Diterima 2 September 2016; Direvisi 15 September 2017; Disetujui 30 Oktober 2017

ABSTRACT

Large Magellanic Cloud (LMC) is a home of thousands of star clusters with various ages and metallicities. This galaxy also becomes the ideal laboratory for understanding binary cluster population which is large in number. One of the binary cluster candidates within the galaxy is OGLE-LMC 316/317 which is located near the bar of LMC. The age of OGLE-LMC 317 had not been determined, while the age of OGLE-LMC 316 was doubted. Whereas, age is an important parameter in the study of system binarity. In this study, photometry data from Optical Gravitational Lensing Experiment (OGLE) was used to construct color magnitude diagram and to estimate the age of OGLE-LMC 316/317. The results were the estimated ages of OGLE-LMC 316 and OGLE-LMC 317 which were 63 and 160 million years respectively. Based on these results, OGLE-LMC 316/317 system which has projected separation of 5 pc can be considered as primordial and coeval binary star cluster.

Keyword: *photometry, binary cluster, Large Magellanic Cloud*

ABSTRAK

Large Magellanic Cloud (LMC) merupakan rumah bagi ribuan gugus bintang dengan beragam usia dan metalisitas. Galaksi ini juga menjadi laboratorium ideal untuk memahami populasi gugus ganda yang melimpah jumlahnya. Salah satu kandidat gugus ganda di dalamnya adalah OGLE-LMC 316/317 yang terletak di dekat batang LMC. Usia OGLE-LMC 317 belum diketahui, sementara usia OGLE-LMC 316 masih disangsikan. Padahal usia adalah parameter penting untuk mempelajari kegandaan dari sistem ini. Pada studi ini, data fotometri *Optical Gravitational Lensing Experiment* (OGLE) digunakan untuk membangun diagram warna magnitudo dan memperkirakan usia OGLE-LMC 316/317. Hasilnya, OGLE-LMC 316 diperkirakan berusia 63 juta tahun sementara OGLE-LMC 317 setidaknya berusia 160 juta tahun. Berdasarkan hasil ini, sistem OGLE-LMC 316/317 yang memiliki jarak pisah di bidang langit sebesar 5 pc dapat dianggap sebagai gugus ganda *primordial* dan *coeval*.

Kata kunci: *fotometri, gugus ganda, Large Magellanic Cloud*

1 PENDAHULUAN

Awan Magellan Besar (*Large Magellanic Cloud*, LMC) merupakan galaksi ireguler yang paling dekat dari Bimasakti dan menjadi rumah bagi ribuan gugus bintang dengan beragam usia dan metalisitas serta sejarah pembentukan yang menarik (Harris dan Zaritsky, 2009; Baumgardt *et al.*, 2013). Galaksi yang memiliki modulus jarak 18,49 dan berada pada jarak 49,89 kpc (de Grijs *et al.*, 2014) ini juga mengandung ratusan pasangan gugus bintang yang tampak berdekatan dan dianggap sebagai kandidat gugus ganda (Bhatia dan Hatzidimitriou, 1988; Pietrzynski dan Udalski, 2000b). Berdasarkan hasil survey menggunakan *United Kingdom Schmidt Telescope*, (Bhatia dan Hatzidimitriou, 1988) berhasil mengidentifikasi 69 pasangan gugus bintang dengan jarak pisah di bidang langit tidak lebih dari 18 pc. Lebih dari satu dekade berikutnya, Pietrzynski dan Udalski (2000b) mendaftarkan 100 kandidat sistem gugus jamak (*multiple clusters*) berdasarkan data pengamatan *Optical Gravitational Lensing Experiment* (OGLE, Udalski *et al.*, 1997). Sebagian besar di antara pasangan tersebut memiliki umur yang hampir sama sehingga dapat dianggap sebagai sistem *coeval* sementara beberapa yang lainnya bisa jadi tampak berdekatan secara kebetulan

(Bhatia dan Hatzidimitriou, 1988; Dieball *et al.*, 2002).

Populasi gugus ganda di LMC memiliki daya tarik yang istimewa karena jumlahnya lebih tinggi dibandingkan populasi sejenis di Bimasakti, khususnya di sekitar Matahari (Subramaniam *et al.*, 1995; de la Fuente Marcos dan de la Fuente Marcos, 2009). Salah satu faktor yang menyebabkan tingginya jumlah gugus ganda di LMC adalah tingginya dispersi kecepatan awan molekul di galaksi ini. Dispersi kecepatan yang tinggi dipicu oleh papasan antara LMC dan *Small Magellanic Cloud* (SMC) sekitar 200 juta tahun yang lalu (Gardiner *et al.*, 1994). Kejadian dramatis ini dapat meningkatkan laju pembentukan gugus dan juga meningkatkan frekuensi papasan antar awan molekul menjadi mekanisme pembentukan gugus ganda (Fujimoto dan Kumai, 1997; Bekki *et al.*, 2004). Namun, kala hidup gugus ganda tergolong singkat, yakni sekitar 100 juta tahun (Bhatia, 1990). Gugus ganda dengan separasi kecil mengalami pasang surut internal yang berakhir pada penggabungan, sementara sistem dengan separasi besar akan terpisah karena gangguan eksternal (De la Fuente Marcos dan De la Fuente Marcos, 2010; Priyatikanto *et al.*, 2016).

Untuk memahami karakteristik gugus ganda di LMC, perlu dilakukan studi statistik yang komprehensif

terhadap populasi ini. Langkah semacam ini pernah dilakukan oleh Dieball *et al.* (2002) menggunakan katalog gugus bintang yang disusun oleh Bica *et al.* (1999). Beberapa karakter yang didiskusikan dalam pekerjaan tersebut adalah jarak pisah komponen, distribusi ukuran, distribusi spasial di LMC, serta usianya. Untuk telaah usia gugus dalam sistem gugus ganda, (Dieball *et al.*, 2002) hanya menggunakan sekitar 27% dari total populasi karena usia sebagian besar gugus memang belum diketahui. Keterbatasan yang sama masih ditemui pada katalog terbaru (misalnya Bica *et al.*, 2008; Baumgardt *et al.*, 2013). Masih banyak kandidat gugus ganda di LMC yang belum diperkirakan usianya, salah satunya adalah OGLE-LMC 317 yang berada dekat dengan OGLE-LMC 316 (Pietrzynski *et al.*, 1999; Pietrzynski dan Udalski, 2000a).

Sebagai langkah awal untuk melengkapi data katalog gugus ganda di LMC, dilakukan telaah terhadap data fotometri OGLE (Udalski *et al.*, 1997; Szymanski, 2005), terutama pada arah OGLE-LMC 316/317, untuk memperkirakan usia kedua gugus serta menelaah kegandaan dari sistem tersebut. Data fotometri dan juga model *isochrone* yang digunakan dalam studi ini akan diulas secara singkat pada Bagian 2. Metode dekontaminasi diagram warna-magnitudo (*Color-Magnitude Diagram*, CMD) akan dijelaskan pada Bagian 3. Hasil implementasi metode tersebut serta pembahasan yang terkait akan disampaikan pada Bagian 4.

2 DATA

2.1 Fotometri OGLE

Data fotometri yang digunakan dalam studi ini merupakan hasil survei OGLE ke arah LMC pada pita B, V, dan I (Udalski *et al.*, 1997). Teleskop yang digunakan dalam survei ini adalah teleskop Warsaw berdiameter 1,3 m yang berada di *Observatorium Las Campanas*, Chile. Detektor yang digunakan adalah kamera *Charge Coupled Device* (CCD)

berukuran 2048×2048 *pixel* dengan ukuran *pixel* 24 mikron serta skala bayangan 0,417 detik busur/*pixel*. Pada arah LMC, katalog fotometri OGLE mencakup area dengan luas 4,5 derajat persegi serta berisikan $6,8 \times 10^6$ obyek pada pita I. Ekstraksi *fluks* untuk setiap obyek dilakukan dengan metode fotometri *Point Spread Function* (PSF). Dengan sistem semacam ini, OGLE dapat mendeteksi obyek dengan magnitudo V antara 12 hingga 22.

Data fotometri obyek dari survei OGLE diakses secara *on-line* sebagaimana dideskripsikan oleh Szymanski (2005). Data yang diunduh berisikan data posisi (asensio rekta dan deklinasi), identitas obyek (menurut penomoran OGLE), serta magnitudo dan galat magnitudo obyek pada pita V dan I. Magnitudo pada pita B tidak digunakan dalam studi ini karena tingkat kelengkapan data yang jauh lebih rendah. Area langit yang ditelaah berukuran $150'' \times 150''$ dan berpusat di OGLE-LMC 317 ($\alpha = 79,44142^\circ$, $\delta = -69,57344^\circ$). Area tersebut mencakup OGLE-LMC 316/317, OGLE-LMC 321 serta bintang-bintang medan yang digunakan dalam proses dekontaminasi CMD. Gambar 2-1 menunjukkan lokasi objek di dekat batang LMC.

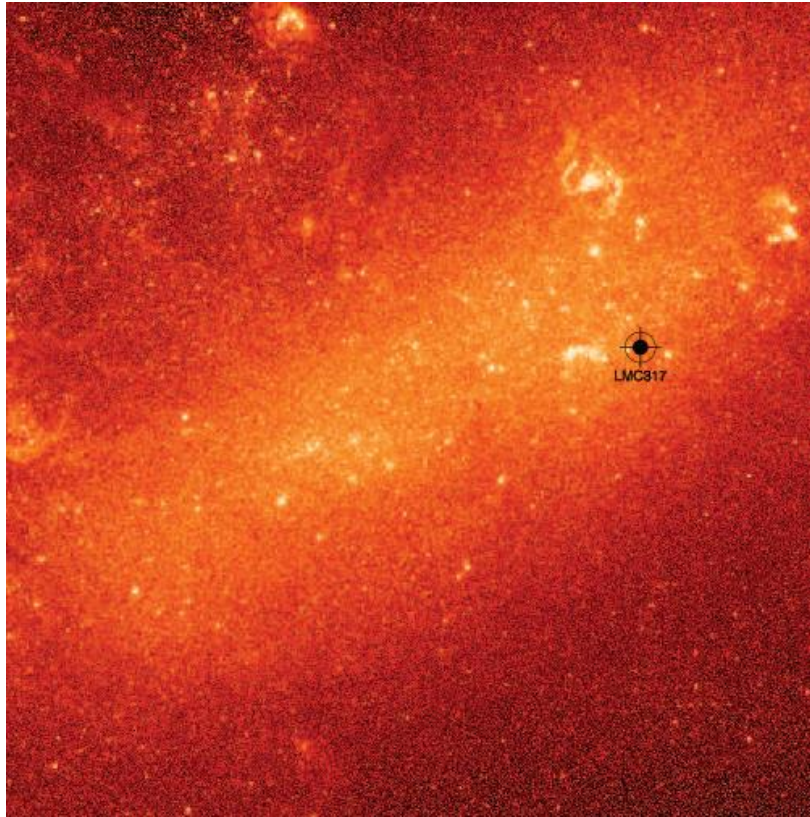
Karakteristik dan akurasi fotometri OGLE dapat dilihat dari Gambar 2-2. Nilai median galat magnitudo pita V (σ_V) adalah 0,12 sementara median galat magnitudo pita I (σ_I) adalah 0,17. Dengan statistik semacam ini, dirasa cukup bijak untuk menggunakan data dengan $\sigma_V \leq 0,2$ dan $\sigma_I \leq 0,2$ untuk proses selanjutnya.

2.2 PARSEC Isochrone

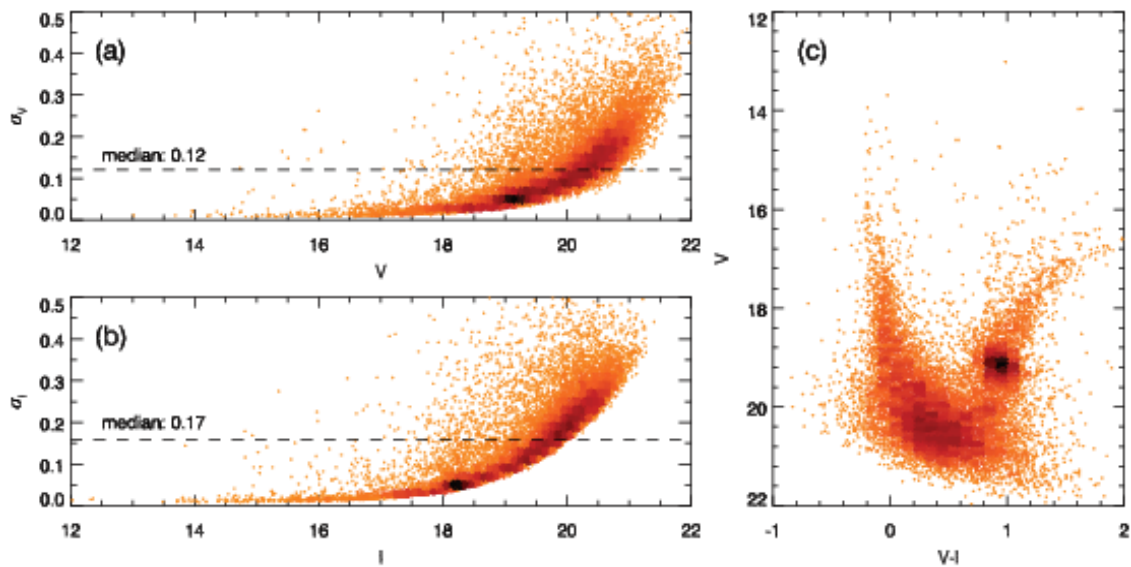
Untuk memperkirakan usia gugus bintang di LMC, digunakan suatu model *isochrone* yang pada dasarnya merupakan data fotometri bintang dengan berbagai massa, tetapi memiliki usia yang sama. Dalam studi ini, digunakan PARSEC Isochrone (Bressan *et al.*, 2012) versi 1.2S yang mencakup rentang massa 0,1 hingga 350 kali massa Matahari serta rentang metalisitas

$0,0001 \leq Z \leq 0,02$. Rentang umur yang digunakan adalah $6,60 \leq \log(t) \leq 10,0$ dengan jeda $\Delta \log(t) = 0,05$. Parameter fisis bintang yang dihasilkan perlu diterjemahkan ke dalam aspek

observasional, terutama magnitudo mutlak bintang. Proses ini dilakukan dengan mengadopsi model atmosfer bintang tertentu.



Gambar 2-1: Citra *Digitized Sky Survey* (DSS) berukuran $2^\circ \times 2^\circ$ dari LMC yang diambil pada pita R. Titik tebal menandai lokasi OGLE-LMC 316/317 yang menjadi fokus dalam studi ini. Data diambil dari *Digitized Sky Survey Data Archive* dari National Astronomical Observatory of Japan (<https://dss.naoj.ac.jp>)



Gambar 2-2: Karakteristik data fotometri OGLE pada arah OGLE-LMC 316/317 yang direpresentasikan oleh plot galat magnitudo pada pita V (a) dan I (b) serta *Hess-diagram* (c)

Dalam studi ini, *isochrone* yang digunakan memiliki metalisitas $Z = 0,008$ yang menjadi nilai tipikal gugus bintang di LMC (Pietrzynski dan Udalski, 2000b). Sistem fotometri yang digunakan adalah fotometri OGLE yang sedikit berbeda dengan sistem fotometri Bessel. Fungsi massa awal yang digunakan dalam model ini adalah fungsi massa *Canonical Two-Part-Power Law* (Kroupa, 2001; Kroupa dan Boily, 2002). Dibandingkan dengan model terdahulu, PARSEC *Isochrone* telah mencakup bintang pra-deret utama sehingga cocok untuk menganalisis gugus bintang berusia beberapa juta tahun.

3 METODOLOGI

Terdapat sejumlah cara untuk memperkirakan usia gugus bintang, di antaranya adalah pencocokan *isochrone* dengan data fotometri, terutama pada diagram warna-magnitudo (CMD). Namun, proses ini tidak dapat dilakukan dengan mudah karena bintang anggota gugus tampak bercampur dengan bintang medan yang ada pada arah yang sama. Dampaknya adalah CMD yang tidak murni dan perlu dibersihkan (dekontaminasi). Proses dekontaminasi dilakukan dengan mengasumsikan bahwa bintang-bintang anggota gugus memiliki karakteristik fisik, kinematik, dan spasial yang hampir mirip. Untuk gugus bintang di Bimasakti, data kinematik seperti gerak diri (*proper motion*) atau kecepatan radial dapat digunakan untuk keperluan ini (misalnya Priyatikanto dan Arifyanto, 2015), tetapi data semacam ini hampir tidak ada untuk gugus ekstragalaktik. Maka dari itu, proses dekontaminasi hanya dapat dilakukan berdasarkan data fotometri dan posisi (spasial).

Dekontaminasi data fotometri atau dekontaminasi CMD biasa dilakukan dengan metode non-parametrik melalui berbagai pendekatan. Terdapat dua metode dekontaminasi CMD yang digunakan dalam studi ini, yakni metode eliminasi dan metode kerapatan lokal. Keluaran dari proses dekontaminasi adalah probabilitas keanggotaan secara

fotometri. Parameter kuantitatif ini akan dipadukan dengan pembobotan spasial untuk mendapatkan probabilitas keanggotaan final. Bintang-bintang dengan probabilitas keanggotaan lebih dari 50% digunakan untuk *isochrone fitting*.

3.1 Metode Eliminasi

Metode eliminasi yang digunakan dalam studi ini terinspirasi dari Piatti dan Bica (2012). Dalam metode ini, terdapat dua jenis area yang ditelaah, yakni area gugus (*in-field*) dan area medan (*out-field*). Area gugus adalah lingkaran yang berpusat pada gugus dan memiliki radius 2 kali radius gugus (R_C) sebagaimana tercatat dalam katalog (Pietrzynski *et al.*, 1999). Area medan adalah empat buah lingkaran yang berjarak $4R_C$ dari gugus dan memiliki luas masing-masing $\frac{1}{4}$ dari area gugus. Dengan demikian, luas total area medan sama dengan luas area gugus. Area medan dianggap hanya berisikan bintang medan saja sehingga lokasi area medan dipastikan tidak beririsan dengan lokasi gugus bintang.

Piatti dan Bica (2012) menggunakan bintang di area medan (bintang medan) untuk melakukan eliminasi terhadap bintang di area gugus. Prinsipnya, setiap bintang medan memiliki area bebas (*free path*) di CMD berbentuk persegi panjang dengan ukuran $\Delta_{VI} \times \Delta_V$, dengan Δ_{VI} menyatakan jarak bintang terdekat pada arah mendatar ($V - I$) sedangkan Δ_V menyatakan jarak terdekat pada arah vertikal (V). Namun, ada syarat tambahan yang diterapkan, yakni $\Delta_{VI} < 0,8$ dan $\Delta_V < 1,0$. Bila terdapat bintang di area gugus yang berada di area bebas yang telah didefinisikan, maka bintang tersebut akan tereliminasi. Setiap bintang medan memberikan sumbangsih terhadap satu kali eliminasi. Semakin sedikit bintang mengalami eliminasi, semakin besar probabilitasnya sebagai anggota gugus.

3.2 Metode Kerapatan Lokal

Metode ini dapat dianggap sebagai penyederhanaan dari metode non-

parametrik yang dideskripsikan oleh Priyatikanto dan Arifyanto (2015). Deskripsi *in-field* dan *out-field* dalam metode ini tidak berbeda dengan deskripsi sebelumnya. Perbedaan terletak pada proses pemodelan CMD dari bintang medan dan juga CMD dari bintang dalam area gugus.

Probabilitas bintang anggota gugus dinyatakan sebagai:

$$P = 1 - \frac{f_{out}}{f_{in}} \quad (3-1)$$

dengan f_{in} dan f_{out} berturut-turut menyatakan kerapatan CMD area gugus dan CMD bintang medan. Kerapatan lokal CMD diperkirakan dengan metode histogram 2-dimensi dengan lebar kelas 0,04 pada sumbu mendatar dan 0,1 pada sumbu vertikal. Galat magnitudo dan warna diperhitungkan dalam memperkirakan kerapatan lokal. Caranya adalah dengan membuat 50 *dummy points* yang terdistribusi normal di sekitar setiap titik data. Lebar sayap (1 σ) dari distribusi tersebut sama dengan galat magnitudo dan warna.

3.3 Pembobotan Spasial

Probabilitas keanggotaan yang diperoleh berdasarkan data fotometri perlu disempurnakan dengan pembobotan spasial. Bintang yang berada di pusat gugus memiliki bobot yang lebih tinggi dibandingkan bintang yang ada di tepian area gugus. Untuk keperluan pembobotan secara parametrik, fungsi kerapatan yang digunakan adalah fungsi kerapatan EFF (Elson *et al.*, 1987) yang lebih cocok digunakan untuk gugus bintang LMC. Kerapatan bintang sebagai fungsi radius dinyatakan sebagai:

$$n(r) = n_0 \left(1 + \frac{r^2}{R_c^2} \right)^{-\gamma/2} \quad (3-2)$$

dengan n_0 menyatakan kerapatan pusat gugus, r menyatakan jarak dari pusat, a menyatakan skala radius (*core parameter*), dan γ menyatakan gradien kerapatan EFF. Dalam studi ini, digunakan $n_0 = 1$, $a = 2/3 R_c$, dan $\gamma = 1,0$. Bobot yang diberikan sebanding dengan nilai n setiap bintang.

4 HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 OGLE-LMC 317

Hasil dekontaminasi dan pencocokan isochrone terhadap CMD gugus bintang OGLE-LMC317 disajikan pada Gambar 4-1 dan Gambar 4-2. Keduanya berturut-turut diperoleh dengan metode eliminasi dan kerapatan lokal yang memperhitungkan galat magnitudo. Area medan yang digunakan pada kedua proses adalah sama, yakni berada di sebelah utara dari gugus. Pemilihan lokasi didasari oleh posisi OGLE-LMC 321 yang berada di sebelah selatan OGLE-LMC 317. Selain itu, ada area kosong di sebelah selatan karena bintang latar depan yang amat terang menutupi pandangan ke arah LMC.

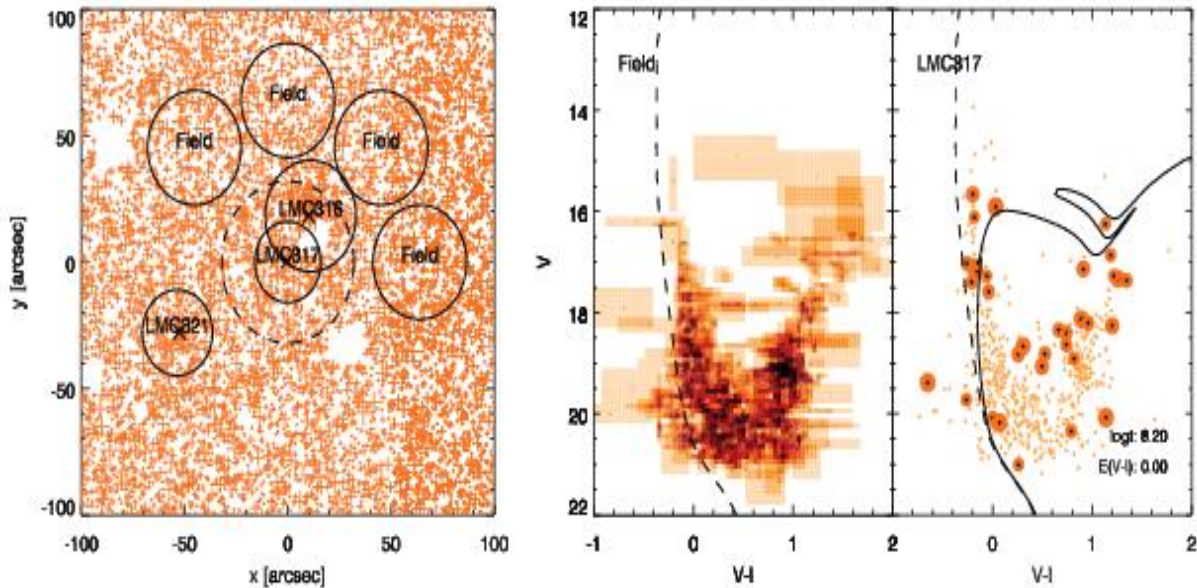
Metode eliminasi dan kerapatan lokal memiliki kinerja yang berbeda dalam proses dekontaminasi. Hasil yang diperoleh pun berbeda. Sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 4-1, daerah eliminasi tidaklah seragam dan menyisakan beberapa celah, terutama di sekitar cabang subraksasa (*subgiant branch*) dan bagian bawah deret utama. Konsekuensinya, terdapat sejumlah bintang yang memiliki probabilitas keanggotaan yang tinggi tetapi dapat dianggap residu.

Hal serupa pernah didiskusikan oleh (Piatti *et al.*, 2014) yang menggunakan metode sejenis untuk menganalisis gugus bintang dari *VISTA survey Magellanic of the Magellanic Clouds system* (VMC). Pembobotan berdasarkan data spasial mengurangi residu semacam ini. Pembobotan yang diterapkan juga dapat menanggalkan beberapa bintang terang yang berada jauh dari pusat OGLE-LMC317, misalnya beberapa bintang

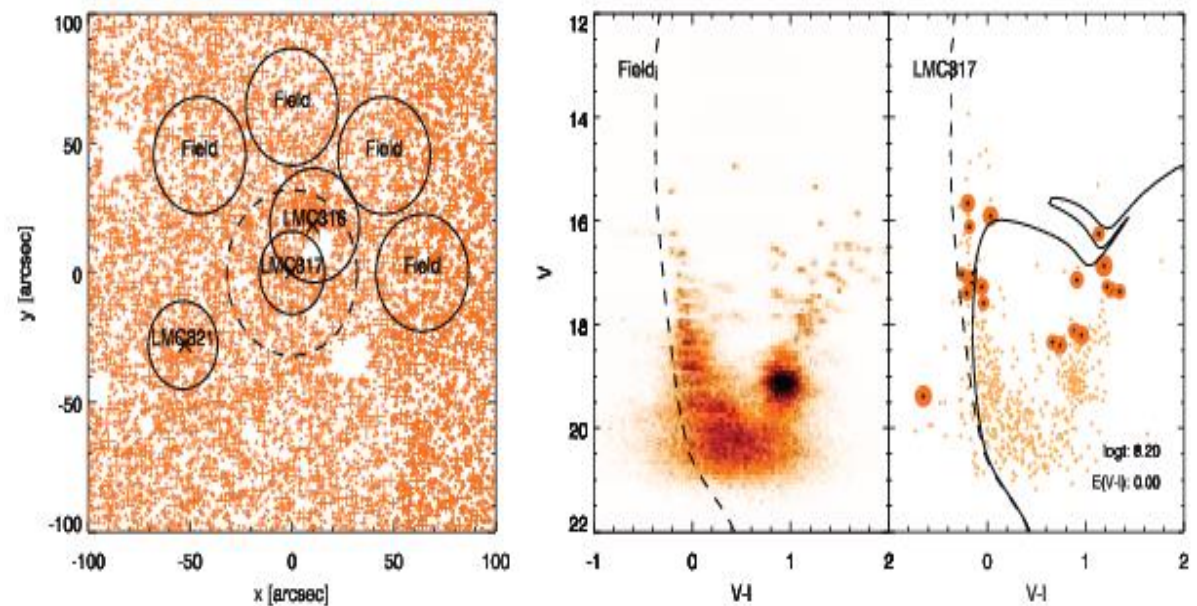
yang sebenarnya berada di gugus OGLE-LMC316. Meski demikian, daerah subraksasa tidak sepenuhnya bersih. Metode kedua lebih tegas dalam memilih bintang anggota gugus. Hampir seluruh bintang deret utama dengan magnitudo $V > 18$ dianggap memiliki probabilitas keanggotaan $< 50\%$. Dibandingkan metode sebelumnya, bintang dengan probabilitas $> 50\%$ di cabang subraksasa

lebih sedikit, tetapi tetap ada segerombolan bintang di daerah ini.

Dengan CMD semacam itu, isochrone dengan $\log t = 8,20$ dengan modulus jarak 18,49 dan eksc warna $E_{V-I} = 0,0$ dianggap sebagai model yang paling cocok. Dengan kata lain, usia OGLE-LMC 317 adalah sekitar 160 juta tahun.



Gambar 4-1: Kiri: posisi bintang yang dianalisis dalam studi ini. Lingkaran dengan garis putus-putus menandai area gugus, sementara lingkaran dengan tanda *field* merupakan empat area medan yang digunakan. Tengah: model CMD medan untuk proses eliminasi. Kanan: CMD dari area gugus OGLE-LMC317 yang telah dibersihkan dengan metode eliminasi. Lingkaran besar adalah bintang dengan probabilitas keanggotaan $\geq 50\%$. Zero-age main sequence (ZAMS, garis putus-putus) dan isochrone dengan $E_{V-I} = 0,0$ dan $\log t = 8,20$ (garis teges) turut digambarkan



Gambar 4-2: Sama seperti Gambar 4-1, tetapi diperoleh dengan metode kerapatan lokal

4.2 OGLE-LMC 316

Proses dekontaminasi CMD dari OGLE-LMC 316 berjalan lebih mulus karena gugus ini tergolong sebagai gugus yang cukup kaya dan memiliki kerapatan yang lebih tinggi dibandingkan gugus pasangannya.

Sebagaimana diperlihatkan dalam Gambar 4-3, kedua metode dekontaminasi memberikan hasil yang tidak jauh berbeda, tetapi metode eliminasi memberikan lebih banyak kandidat bintang anggota dibandingkan metode kerapatan lokal.

CMD dari OGLE-LMC 316 memiliki fitur yang amat jelas, yakni deret utama yang merentang hingga magnitudo $V \approx 14$ dan sebuah kandidat bintang anggota yang telah menempati daerah giant branch.

Probabilitas keanggotaan bintang ini adalah sekitar 80% sehingga cukup meyakinkan untuk dianggap sebagai anggota OGLE-LMC 316. Sejumlah residu di daerah cabang sub raksasa tidak dapat dibersihkan menggunakan area medan yang berbeda sekalipun. Namun, bintang-bintang residu ini cenderung memiliki probabilitas keanggotaan yang lebih rendah dibandingkan bintang-bintang di bagian atas deret utama. Dengan mengadopsi modulus jarak dan ekscenitritas warna yang sama dengan OGLE-LMC 317, model yang paling cocok merepresentasikan data OGLE-LMC 316 adalah isochrone dengan $\log t = 7,80$. Usia gugus yang diperoleh dengan *fitting* ini adalah 63 juta tahun. Hasil ini 10 kali lebih tinggi dibandingkan usia yang diperoleh (Pietrzyński dan Udalski, 2000a) yang menganalisis set data yang sama. Mereka mendapatkan $\log t = 6,80 \pm 0,20$. Perbedaan usia yang sangat jelas semacam ini pernah didiskusikan oleh (Dieball *et al.*, 2002). Tim OGLE mengadopsi nilai modulus jarak yang lebih kecil, yakni 18,24 sementara nilai $18,49 \pm 0,09$ merupakan konsensus terbaru yang dianggap sebagai nilai terbaik (de Grijs *et al.*, 2014). Namun,

perbedaan modulus jarak tidak dapat dianggap sebagai kambing hitam dalam permasalahan ini karena modulus jarak yang lebih kecil cenderung menuntun pada perkiraan usia gugus yang lebih tua. Perbedaan model populasi bintang (*isochrone*) dan proses dekontaminasi CMD boleh jadi memunculkan perbedaan usia.

4.3 Kegandaan OGLE-LMC 316/317

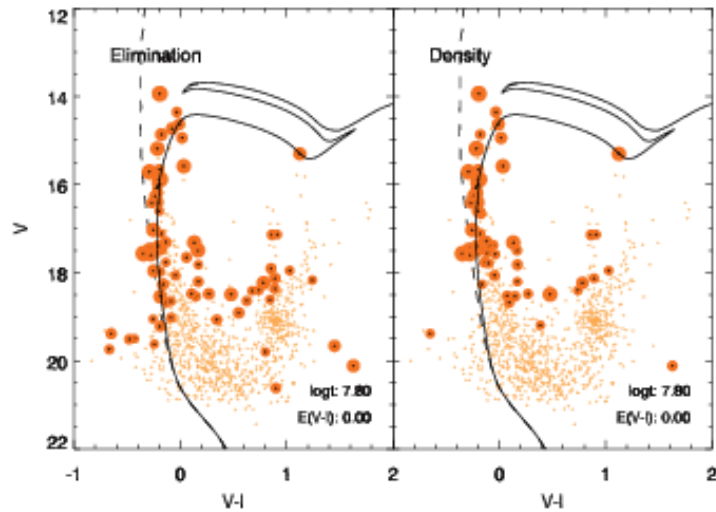
Pasangan OGLE-LMC 316/317 muncul pertama kali sebagai kandidat gugus ganda dalam katalog gugus ganda dan jamak yang disusun oleh Pietrzyński dan Udalski (2000b). Katalog Bhatia dan Hatzidimitriou (1988) belum mendeteksi OGLE-LMC 317 sebagai sebuah gugus bintang karena kedalaman survei yang berbeda. OGLE-LMC 316 memiliki radius sekitar 14 pc sementara OGLE-LMC 317 memiliki radius 8 pc (Bica *et al.*, 2008). Di bidang langit, keduanya terpisah sejauh 5 pc sehingga jarak pisah dalam ruang 3-dimensi lebih dari nilai ini. Bila jarak pisah sistem kurang dari radius OGLE-LMC 316, maka sistem ini dapat dianggap sebagai sistem *contact* menurut klasifikasi de la Fuente Marcos dan de la Fuente Marcos (2009). Hal ini cukup sulit untuk dikonfirmasi karena penentuan jarak pisah pada arah radial bukan urusan mudah. Tidak ada indikasi perbedaan ekstingsi yang dialami kedua gugus sehingga cukup logis untuk mengatakan bahwa jarak kedua gugus dari pengamat tidak jauh berbeda.

Interaksi gravitasi antara dua gugus yang berdekatan sebenarnya dapat diindikasikan oleh adanya distorsi bentuk gugus (misalnya de Oliveira *et al.*, 2000) yang dapat dilihat dari morfologi isophot sistem. Namun, kontur isophot atau kerapatan spasial OGLE-LMC 316/317 tidak dapat dibuat berdasarkan katalog fotometri OGLE karena ada daerah yang saturasi oleh bintang terang.

Kegandaan OGLE-LMC 316/317 juga dapat diperiksa dari usia kedua

gugus. Berdasarkan penentuan usia yang dilakukan dalam studi ini, kandidat

gugus ganda OGLE-LMC 316/317 memiliki komponen dengan usia 63 dan



Gambar 4-3: Hasil dekontaminasi dan *fitting isochrone* terhadap OGLE-LMC 316. CMD sebelah kiri dibersihkan dengan metode eliminasi sementara CMD sebelah kanan dibersihkan dengan metode kerapatan lokal

160 juta tahun. Usia OGLE-LMC 317 dapat lebih dari 160 juta tahun bila sejumlah bintang di cabang subraksasa memang anggota dari gugus. Bila populasi ini dipertimbangkan dalam *fitting isochrone*, maka usia gugus dapat menjadi dua kali lipat ($\log t \approx 8,50$). Selisih usia ini tidak didiskusikan oleh Pietrzynski dan Udalski (2000b) karena mereka tidak dapat memperkirakan usia OGLE/LMC 316. Namun, mereka mengelompokkan pasangan ini bersama dengan OGLE/ LMC 321 yang berusia 126 juta tahun sebagai sistem gugus jamak. Garis merah yang dapat ditarik adalah bahwa OGLE-LMC 316 memiliki usia yang lebih muda dibandingkan dua tetangganya.

Selisih usia yang teramati memang tidak terlalu lebar, yakni sekitar 100 juta tahun. Fakta ini menuntun pada pemikiran bahwa sistem OGLE-LMC 316/317 merupakan sistem gugus ganda primordial dan coeval yang terbentuk dari awan molekuler yang sama. Terdapat dua teori pembentukan yang dapat diaplikasikan pada kasus ini, yakni mekanisme fisis awan molekuler (Fujimoto dan Kumai, 1997; Bekki *et al.*, 2004) dan

mekanisme pembentukan bertahap (Brown *et al.*, 1991, 1995; Theis, 2002).

Menurut teori pertama, papasan atau gesekan (*oblique collision*) antara dua awan molekuler menyebabkan peningkatan kerapatan awan yang diikuti oleh kontraksi dan fragmentasi. Dalam perjalanannya, energi tumbukan ditransformasikan menjadi rotasi yang dapat memecah awan menjadi dua bagian atau lebih. Setiap bagian akan menjadi gugus tunggal yang menjadi bagian dari sistem gugus ganda atau jamak. Produk dari proses ini adalah dua gugus dengan karakter kimia (metalinitas) yang sama serta usia yang hampir sama. Perbedaan usia antar komponen dapat muncul karena skala waktu pembentukan keduanya berbeda.

Menurut teori kedua, awan molekuler mengalami kontraksi dan menghasilkan satu gugus bintang yang masih diselubungi oleh awan sisa pembentukan gugus. Beberapa bintang masif memberikan dorongan kepada awan melalui mekanisme semburan angin bintang atau *supernova*. Dorongan ini dapat memampatkan awan yang menyelubungi gugus hingga kerapatan yang cukup tinggi sehingga pembentukan

bintang tahap kedua dapat terjadi. Produk dari proses ini adalah dua sistem bintang yang memiliki metalisitas berbeda dan usia yang terpaut sekitar 100 juta tahun. Selisih usia ini ditentukan oleh skala waktu evolusi bintang masif dan juga skala waktu pembentukan gugus pada tahap kedua. Dari sudut pandang dinamika banyak benda, Theis (2002) telah menunjukkan bahwa pembentukan bertahap dapat menghasilkan dua gugus bintang yang terpisah. Sistem semacam ini cenderung memiliki kala hidup yang relatif singkat karena orbitnya yang amat lonjong (de la Fuente Marcos dan de la Fuente Marcos, 2010).

5 KESIMPULAN

Pada studi ini, data fotometri OGLE pada arah gugus bintang OGLE-LMC 316/317 telah dianalisis dalam rangka memperkirakan usia kedua gugus. Dekontaminasi dengan metode eliminasi dan kerapatan lokal telah diterapkan bersama pembobotan spasial untuk membersihkan CMD gugus sebelum *fitting* ischrone dilakukan. Hasilnya, usia OGLE-LMC 316 diperkirakan sekitar 63 juta tahun sementara usia OGLE-LMC 317 adalah sekitar 160 juta tahun. Berdasarkan hasil ini, sistem OGLE-LMC 316/317 yang memiliki jarak pisah di bidang langit sebesar 5 pc dapat dianggap sebagai gugus ganda *primordial* dan *coeval*. Sistem semacam ini dapat terbentuk melalui dua mekanisme yang mungkin, yakni mekanisme fisi awan molekul dan mekanisme pembentukan bertahap. Observasi dan studi yang lebih mendalam, terutama dengan spektroskopi, perlu dilakukan untuk mengkonfirmasi hal ini.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis berterima kasih kepada penelaah yang telah memberikan masukan perbaikan terhadap artikel ini.

DAFTAR RUJUKAN

- Baumgardt, H., G. Parmentier, P. Anders, and E. Grebel, 2013. *The star cluster formation history of the LMC*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 430, 676.
- Bekki, K., M. A. Beasley, D. A. Forbes, and W. J. Couch, 2004. *Formation of star clusters in the Large Magellanic Cloud and Small Magellanic Cloud. I. Preliminary results on cluster formation from colliding gas clouds*. The Astrophysical Journal, 602, 730.
- Bhatia, R., 1990. *Merger and disruption lifetimes of binary star clusters in the Large Magellanic Cloud*. Publication of the Astronomical Society of Japan, 42, 757.
- Bhatia, R. and D. Hatzidimitriou, 1988. *Binary star cluster in the Large Magellanic Cloud*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 230, 215.
- Bica, E., C. Bonatto, C. Dutra, and J. Santos, Jr. 2008. *A general catalogue of extended objects in the Magellanic System*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 389, 678.
- Bica, E., H. Schmitt, C. Dutra, and H. Oliveira, 1999. *A revised and extended catalog of Magellanic system clusters, associations, and emission nebulae. II. The Large Magellanic Cloud*. The Astronomical Journal, 117, 238.
- Bressan, A., P. Marigo, L. Girardi, B. Salasnich, C. Dal Cero, S. Rubele, and A. Nanni, 2012. *PARSEC, stellar tracks and isochrones with the PAdova and TRieste Stellar Evolution Code*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 427, 127.
- Brown, J. H., A. Burkert, and J. W. Truran, 1991. *On the formation of globular clusters. I. Dynamical limits on globular cluster metallicities*. The Astrophysical Journal, 376, 115.
- Brown, J. H., A. Burkert, and J. W. Truran, 1995. *On the formation of globular clusters. II. Early dynamical evolution*. The Astrophysical Journal, 440, 666.
- de Grijs, R., J. Wicker, and G. Bono, 2014. *Clustering of local group distances, publication bias or correlated measurements? I. The Large Magellanic Cloud*. The Astronomical Journal, 147, 122.
- de la Fuente Marcos, R. and C. de la Fuente Marcos, 2009. *Double or binary, on the multiplicity of open star clusters*. Astronomy and Astrophysics, 500, L13.
- de la Fuente Marcos, R. and C. de la Fuente Marcos, 2010. *The evolution of primordial binary open star clusters, mergers, shredded secondaries, and separated twins*. The Astrophysical Journal, 719, 104.
- de Oliveira, M. R., C. M. Dutra, E. Bica, E. and E. H. Bica, 2000. *Morphologies and ages of star cluster pairs and multiplets in the Small*

- Magellanic Cloud*. Astronomy and Astrophysics Supplement Series, 146, 57.
- Dieball, A., H. Muller, and E. Grebel, 2002. *A statistical study of binary and multiple clusters in the LMC*. Astronomy and Astrophysics, 391, 547.
- Elson, R. A. W., S. Fall, and K. C. Freeman, 1987. *The structure of young star clusters in the Large Magellanic Cloud*. The Astrophysical Journal, 323, 54.
- Fujimoto, M. and Y. Kumai, 1997. *Star clusters driven to form by strong collisions between gas clouds in high-velocity random motion*. The Astronomical Journal, 113, 249.
- Gardiner, L. T., T. Sawa, and M. Fujimoto, 1994. *Numerical simulations of the Magellanic system - I. Orbits of the Magellanic Clouds and the global gas distribution*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 266, 567.
- Harris, J. and D. Zaritsky, 2009. *The star formation history of the Large Magellanic Cloud*. The Astronomical Journal, 138, 1243–1260.
- Kroupa, P. 2001. *On the variation of the initial mass function*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 322, 231.
- Kroupa, P. and C. M. Boily, 2002. *On the mass function of star clusters*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 336, 1188.
- Piatti, A. and E. Bica, 2012. *Washington photometry of candidate star clusters in the Small Magellanic Cloud*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 425, 3085.
- Piatti, A. E., R. Guandalini, V. D. Ivanov, S. Rubele, M. –R. L. Cioni, R. de Grijs, R. B. –Q. For, G. Clementini, V. Ripepi, P. Anders, and J. M. Oliveira, 2014. *The VMC survey. XII. Star cluster candidates in the Large Magellanic Cloud*. Astronomy and Astrophysics, 570, A74.
- Pietrzynski, G. and A. Udalski, 2000a. *The optical gravitational lensing experiment. Ages of about 600 star clusters from the LMC*. Acta Astron. 50, 337.
- Pietrzynski, G. and A. Udalski, 2000b. *The optical gravitational lensing experiment. Multiple cluster candidates in the Large Magellanic Cloud*. Acta Astron. 50, 355.
- Pietrzynski, G., A. Udalski, M. Kubiak, M. Szymanski, P. Wóźniak, and K. Zebrun, 1999. *The optical gravitational lensing experiment. Catalog of star clusters from the Large Magellanic Cloud*. Acta Astron. 49, 521.
- Priyatikanto, R. and M. I. Arifyanto, 2015. *The implementation of binned kernel density estimation to determine open clusters proper motions. Validation of the method*. Astrophysics and Space Science, 355, 161.
- Priyatikanto, R., M. B. N. Kouwenhoven, M. I. Arifyanto, H. R. T. Wulandari, and S. Siregar, 2016. *The dynamical fate of binary star clusters in the Galactic tidal field*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 457, 1339.
- Subramaniam, A., U. Gorti, R. Sagar, and H. Bhatt, 1995. *Probable binary open clusters in the galaxy*. Astronomy and Astrophysics, 302, 86.
- Szymanski, M. 2005. *The optical gravitational lensing experiment. Internet access to the OGLE photometry data set, OGLE-II BVI maps and I-band data*. Acta Astron. 55, 43.
- Theis, C. 2002. *Formation of Twin Clusters in a Galactic Tidal Field*. In Geisler, D. P. Grebel, E. K. and Minniti, D. editors, Extragalactic Star Clusters, volume 207 of IAU Symposium, page 681.
- Udalski, A., M. Kubiak, and M. Szymanski, 1997. *Optical gravitational lensing experiment. OGLE-2 – The second phase of the OGLE project*. Acta Astron. 47, 319.

**DINAMIKA LAPISAN STRATOSFER DI BELAHAN BUMI UTARA DAN DAMPAKNYA TERHADAP WILAYAH TROPIS: STUDI KASUS MUSIM DINGIN 2012-2013
(STRATOSPHERIC DYNAMICS IN THE NORTHERN HEMISPHERE AND ITS IMPACT TO THE TROPICS: A CASE STUDY OF 2012-2013 WINTER)**

Noersomadi

Research Institute for Sustainable Humanosphere (RISH)

Kyoto University, Uji campus

Gokasho, Uji-shi, Kyoto, Japan, 611-0011

e-mail: noersomadi@rish.kyoto-u.ac.jp

Diterima 18 Mei 2017; Direvisi 8 Januari 2018; Disetujui 9 Januari 2018

ABSTRACT

This research aims to investigate the dynamic of static stability (N^2), potential energy of gravity waves (Ep), and vortex in the stratospheric northern hemisphere during 2012-2013 winter using temperature (T) and zonal wind (u) data from NCEP-DOE Reanalysis II. The results showed two occurrences of decreasing N^2 associated with reversal of u in the first and third week of December 2012 were believed as a trigger of Sudden Stratospheric Warmings (SSW) on January 7, 2013. There was a flow from the polar to the tropics region during the SSW event. It caused the tropopause folding in the sub-tropic region indicated by the distribution of Ep on January 24, 2013. This tropopause folding triggered the convective activity over the Indonesian continents as shown by the negative OLR anomaly from 22 to 26 January 2013. The impact of SSW event in the northern hemisphere to the convective activity was 20%. This results showed the interaction between stratosphere and troposphere and also the teleconnection between the polar and the tropics.

Keywords: *SSW, static stability, potential energy of gravity waves, vortex, and stratospheric dynamics*

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan menyelidiki dinamika stabilitas statis (N^2), energi potensial gelombang gravitas (Ep), dan pusaran angin di lapisan stratosfer Belahan Bumi Utara (BBU) selama musim dingin 2012-2013 menggunakan data temperatur (T) dan komponen angin zonal (u) dari *NCEP-DOE Reanalysis II*. Hasil riset menunjukkan bahwa dua kejadian penurunan N^2 pada pekan awal dan ketiga bulan Desember 2012 diyakini sebagai pemicu kejadian *Sudden Stratosphere Warmings* (SSW) tanggal 7 Januari 2013. Pada saat terjadi SSW terdapat aliran dari kutub menuju tropis. Aliran ini mengakibatkan terjadinya pelipatan lapisan tropopause di wilayah sub-tropis yang terlihat pada distribusi Ep tanggal 24 Januari 2013. Pelipatan lapisan tropopause ini kemudian memicu aktivitas konvektif di atas wilayah Indonesia yang ditandai oleh anomali OLR negatif antara tanggal 22-26 Januari 2013. Dampak kejadian SSW di BBU terhadap aktivitas konvektif di atas wilayah kepulauan Indonesia sebesar 20%. Hasil ini membuktikan interaksi antara lapisan stratosfer dan troposfer serta telekoneksi wilayah kutub dan tropis.

Kata kunci: *SSW, stabilitas statis, energi potensial gelombang gravitas, pusaran angin, dinamika stratosfer*

1 PENDAHULUAN

Stratosfer adalah lapisan lebih stabil dari troposfer yang ditandai oleh peningkatan temperatur atmosfer terhadap ketinggian (Fueglistaler dkk., 2009). Lapisan stratosfer global sangat peka terhadap anomali (perubahan dari rerata) cuaca dan iklim di wilayah tropis (Randell dan Wu, 2015). Disisi lain, terdapat dampak timbal balik dari lapisan stratosfer terhadap pertumbuhan awan konvektif di ekuator (Kodera, 2006). Oleh karenanya, penelitian terkait dinamika di lapisan stratosfer, terutama di Belahan Bumi Utara (BBU), penting dilakukan untuk memahami lebih lanjut tentang dampaknya terhadap wilayah tropis.

Variabel angin zonal u dapat diuraikan menjadi komponen rerata ditambah komponen perturbasi, $u = \bar{u} + u'$ (Holton, 2004). Kondisi lapisan stratosfer yang stabil menyebabkan gelombang gravitas atmosfer mudah merambat dan berinteraksi dengan angin dominan (*mean wind or background wind*), yakni angin zonal rerata (\bar{u}). Stabilitas statis atmosfer akan menurun apabila terjadi efek non linier seperti turbulensi dan atau pecah gelombang (Fritts dan Alexander, 2003). Dengan kata lain, nilai stabilitas statis merupakan salah satu indikator untuk mendeteksi adanya: 1) perambatan

gelombang atmosfer (stabil positif), atau 2) turbulensi (stabil negatif) yang mendukung proses pencampuran udara antara lapisan troposfer dan stratosfer (Griise dkk., 2010; Gettleman dkk., 2011).

Parameter stabilitas statis di atmosfer adalah nilai kuadrat frekuensi apung (*buoyancy frequency*) yang sering disebut sebagai *Brunt Väisälä frequency squared* (N^2). VandZandt (1982) memperkenalkan model spektrum gelombang atmosfer sebagai fungsi N^2 . Total energi potensial gelombang atmosfer dapat dihitung dari besaran N^2 untuk panjang gelombang vertikal (m) tertentu (Smith dkk., 1987). Penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa gelombang atmosfer dengan $m < 5$ km akan mudah mengalami saturasi, yaitu saat amplitudo gelombang mencapai maksimum (Fritts dan Rastogi, 1985; Tsuda dkk., 1991).

Ketika gelombang atmosfer mengalami saturasi, maka akan terjadi deposit energi, dan fasa gelombang atmosfer yang berlawanan arah dengan angin dominan akan berinteraksi. Berikutnya, akan tercapai level kritis (paras $u = 0$ m/s) hingga terjadi pembalikan arah angin dominan (Holton, 2004). Konsep ini digunakan untuk menjelaskan proses fisis pembalikan arah \bar{u} yang terjadi bersamaan dengan peningkatan temperatur secara

drastis di lapisan stratosfer BBU (*Sudden Stratosphere Warmings/SSW*) (Albers dan Birner, 2014; Attard dkk., 2016).

SSW adalah kenaikan pesat temperatur rerata zonal sebesar 25 K di lintang 60°LU pada paras tekanan 10 mb (ketinggian ~30 km) yang terjadi dalam waktu beberapa hari sampai dengan dua minggu (<20 hari) (McInturf, 1978; Andrew dkk., 1987). O'Neill (2003) menyatakan bahwa SSW identik dengan perubahan rerata angin baratan ($\bar{u} > 0$) menjadi angin timuran ($\bar{u} < 0$) pada lintang dan paras tekanan yang sama bersesuaian dengan kenaikan temperatur 25 K. Hasil ulasan O'Neill (2003) kemudian dikembangkan oleh Charlton dan Polvani (2007) untuk membuat klasifikasi SSW terkait dengan perubahan angin terhadap dimensi ruang yang disebut pusaran angin. Merujuk definisi dan klasifikasi tersebut, Buttlar dkk., (2015) merekomendasikan penggunaan rerata zonal pada lintang 65°LU untuk menganalisis SSW.

Attard dkk. (2016) melakukan investigasi SSW pada bulan Januari 2013 dan menemukan bahwa proses fisis di lapisan troposfer memicu kejadian SSW di bulan Januari 2013. Akan tetapi, penelitian tersebut tidak menjelaskan bagaimana dampak SSW terhadap wilayah lintang menengah dan ekuator. Pertanyaan riset yang muncul dari hasil Attard dkk. (2016) adalah bagaimana distribusi energi potensial gelombang gravitas (Ep) pada masa pra dan pasca terjadi SSW? Apakah perubahan Ep di stratosfer setelah masa puncak SSW berdampak pada pertumbuhan awan konvektif di ekuator?

Penelitian ini bertujuan memahami dinamika stabilitas statis pada masa pra dan pasca SSW, serta pengaruhnya terhadap pertumbuhan awan konvektif di ekuator terutama di atas kepulauan maritim Indonesia, dengan mengambil studi kasus periode musim dingin di BBU dari November 2012 sampai Maret 2013. Untuk menjawab pertanyaan riset tersebut, penelitian ini menganalisis kondisi stabilitas statis (N^2) dan hasil estimasi energi potensial gelombang atmosfer (Ep)

berdasarkan N^2 serta menginvestigasi dampaknya terhadap wilayah tropis, dengan mengambil studi kasus SSW yang terjadi pada awal Januari 2013.

Sistematika pembahasan karya tulis ilmiah ini dimulai dengan penjabaran latar belakang riset, penjelasan metode penurunan N^2 , dan formula untuk menghitung Ep sebagai fungsi N^2 dan m . Analisis distribusi N^2 dan Ep , serta diskusi tentang mekanisme fisis di lapisan stratosfer pada masa pra dan pasca kejadian SSW diuraikan pada bagian berikutnya. Makalah ini dilengkapi kesimpulan yang berisi rangkuman hasil penelitian.

2 DATA DAN METODOLOGI

NCEP-DOE Reanalysis II adalah data grid global berukuran 2,5° bujur × 2,5° lintang yang memiliki 17 paras tekanan dari permukaan 1000 mb sampai lapisan stratosfer-bawah di ketinggian 10 mb sebagai hasil integrasi data observasi dan model dinamika atmosfer (Kanamitsu dkk., 2002). Penelitian ini menganalisis data harian T dan u periode November 2012 hingga Maret 2013. Untuk mendukung analisis dampak SSW terhadap aktivitas konvektif di wilayah tropis, penelitian ini menggunakan data *Outgoing Long Wave* (OLR), yakni data radiasi gelombang panjang dari pantulan permukaan bumi. Data OLR dianggap mewakili aktivitas konvektif di wilayah ekuator (Kiladis dkk., 2014). Nilai OLR rendah (tinggi) menunjukkan konvektif kuat (lemah).

Karena data T dalam koordinat isobar atau T pada tekanan udara (p) konstan, maka perlu dilakukan konversi $T(p)$ menjadi $T(z)$ sebelum menghitung N^2 . Reichler dkk. (2003); Austin dan Reichler (2008) memperkenalkan metode untuk menghitung gradien temperatur terhadap ketinggian ($\partial T/\partial z$) dari data *grid* dalam koordinat isobar (Persamaan 2-1 dan 2-2).

$$\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial T}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\partial T}{\partial p^\kappa} \frac{\partial p^\kappa}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (2-1)$$

Dengan menggunakan persamaan gas ideal dan kesetimbangan hidrostatis, maka

$$\frac{\partial T}{\partial z} = -\frac{\partial T}{\partial p^{\kappa}} \frac{p^{\kappa}}{T} \frac{\kappa g}{R} \quad (2-2)$$

Nilai N^2 diperoleh dari $\partial T/\partial z$ dan *lapserate* adiabatik kering (g/c_p) (Persamaan 2-3) (Lindzen dan Holton, 1968). g adalah percepatan gravitasi ($9,8 \text{ ms}^{-2}$), dan $c_p = 1004 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ adalah konstanta gas ideal pada tekanan tetap.

$$N^2 = \frac{g}{T} \left[\frac{\partial T}{\partial z} + \frac{g}{c_p} \right] \quad (2-3)$$

Persamaan (2-4) dan (2-5) adalah rumus untuk menghitung estimasi total energi potensial gelombang atmosfer, Ep (dalam satuan J/kg), diperoleh dari integrasi spektrum gelombang atmosfer (F) yang merupakan fungsi N^2 dan m ($m = 1/\lambda_z$), λ_z adalah panjang gelombang vertikal (Tsuda dan Hocke, 2002). Nilai m dipilih untuk $\lambda_{z1} = 2 \text{ km}$ dan $\lambda_{z2} = 5 \text{ km}$, sebagaimana hasil (Tsuda dkk., 2000) yang membuktikan bahwa gelombang atmosfer mudah mencapai saturasi pada interval λ_z tersebut.

$$F = \frac{N^4}{10g^2m^3} \quad (2-4)$$

$$Ep = \int_{m_1}^{m_2} F dm \quad (2-5)$$

Analisis variasi N^2 dan Ep dilengkapi dengan investigasi variasi angin horizontal. Dengan mengambil asumsi bahwa komponen selatan-utara (meridional) dan komponen vertikal vektor angin di lapisan stratosfer sangat kecil dibandingkan dengan komponen barat-timur (zonal), maka penelitian ini hanya menganalisis pusaran angin berdasarkan data u (komponen $\partial u/\partial y$ dan $\partial u/\partial z$) terbatas pada cakupan wilayah BBU (0° - 360° BT, 0° - 90° LU).

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

Kondisi stratosfer di BBU pada ketinggian 10 mb lintang 65° LU selama periode November 2012 sampai Maret 2013 dapat dilihat dari deret waktu u' dan T' (Gambar 3-1). Terdapat dua kejadian penurunan nilai u' positif menjadi negatif 9-10 m/s pada minggu pertama dan ketiga bulan Desember 2012 sebelum drastis mencapai puncak negatif 30-40 m/s di awal Januari 2013. Perubahan nilai u' menandakan perlambatan angin jet baratan di stratosfer. Puncak negatif u' yang menunjukkan penguatan angin timuran secara drastis terjadi pada 7 Januari 2013 disertai oleh kenaikan temperatur hingga melebihi 25 K. Puncak SSW musim dingin 2012-2013 terjadi pada periode awal Januari 2013 (Manney dkk., 2015; Attard dkk., 2016). Pada pertengahan dan akhir bulan Maret 2013 terjadi pembelokan kurva u' yang disertai pula oleh kenaikan T' . Akan tetapi, nilai T' positif sepanjang bulan Maret 2013 tidak termasuk kategori SSW karena tidak ada tanda yang menunjukkan perubahan angin baratan menjadi angin timuran.

Aktivitas gelombang planeter dan gelombang gravitas bertepatan dengan $\bar{u}=0 \text{ m/s}$ (Hei dkk., 2008; Alexander dkk., 2008; Alexander dkk., 2009). Artinya, perlambatan angin baratan hingga mencapai 0 m/s kemudian terjadi penguatan angin timuran menggambarkan keberadaan aktivitas gelombang atmosfer. Hal ini akan didiskusikan lebih rinci pada bagian 3.3.

Attard dkk., 2016 mengategorikan dua penguatan angin timuran yang terjadi pada tanggal 4 dan 26 Desember 2012 sebagai dua gangguan atmosfer yang memicu fenomena SSW tanggal 7 Januari 2013. Mereka menganalisis aktivitas gelombang atmosfer sebagai pemicu SSW dengan menjabarkan aliran momentum yang merambat ke atas dari troposfer. Hal yang belum dijelaskan secara rinci adalah dinamika stabilitas statis sebelum, pada saat, dan setelah

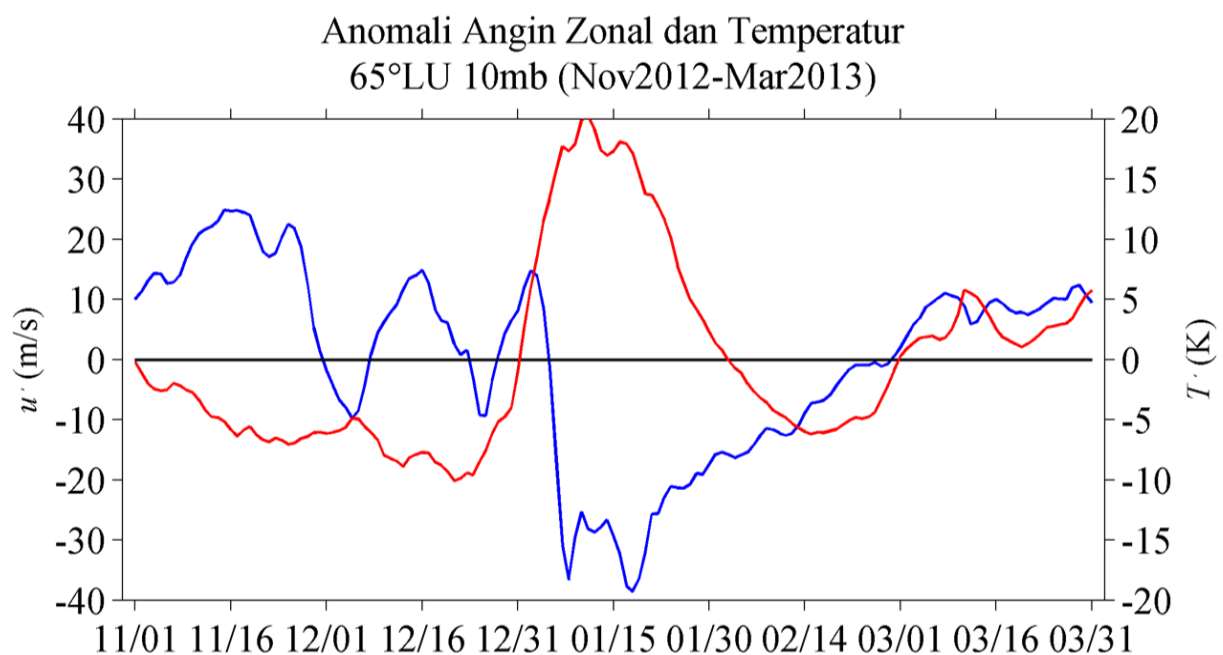
kejadian SSW dari bulan Desember 2012 sampai dengan akhir Januari 2013.

3.1 Dinamika Stabilitas Statis dan Angin Zonal

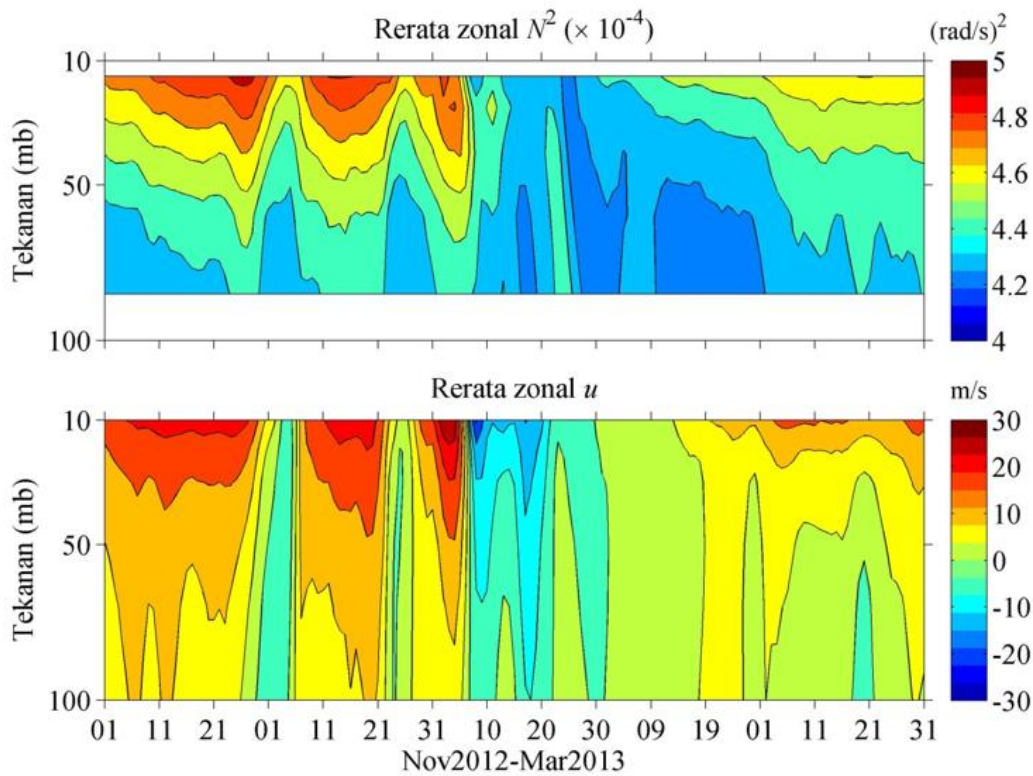
Perambatan gelombang atmosfer dipengaruhi oleh kondisi kestabilan atmosfer. Gelombang atmosfer merambatkan energi bersesuaian dengan kenaikan nilai stabilitas statis. Proses fisis yang mungkin terjadi pada saat nilai stabilitas statis menurun yaitu amplitudo gelombang mencapai titik kritis maksimum dan tidak dapat melebihi nilai kritis tersebut seiring dengan perambatan vertikal ke atas yang berakibat terjadi saturasi gelombang (Fritts dan Alexander, 2003; Alexander dkk., 2010). Proses saturasi gelombang atmosfer akan menyimpan momentum atau energi dan kemudian berinteraksi dengan angin dominan. Interaksi tersebut akan memperlambat angin rerata hingga kemudian membalikkan arahnya. Dinamika saturasi gelombang atmosfer dijelaskan oleh model spektrum gelombang yang merupakan fungsi dari N^2 (Tsuda, 2014; Alexander dkk., 2010).

Gambar 3-2 menunjukkan diagram ketinggian terhadap waktu rerata N^2 dan

u pada paras tekanan 100, 70, 50, 30, dan 10 mb di lintang $65^\circ - 90^\circ$ LU. Dengan mengingat Persamaan (2-3), maka nilai N^2 mewakili paras tekanan 85, 60, 40, dan 15 mb. Terlihat perubahan nilai N^2 dalam waktu singkat terjadi dua kali pada awal dan minggu ketiga bulan Desember 2012 dari 5×10^{-4} (rad/s)² di ketinggian 15 mb menurun hingga $4,2 \times 10^{-4}$ (rad/s)² di ketinggian 60-85 mb. Pola yang sama terlihat pada kontur u yang menunjukkan perlambatan angin baratan 20-30 m/s menjadi angin timuran 5-10 m/s. Pola kejadian penurunan tingkat kestabilan atmosfer bersesuaian dengan pelemahan angin zonal tersebut disebabkan oleh gangguan dari lapisan troposfer. Hal ini sesuai dengan yang diperkirakan dan konsisten dengan riset sebelumnya, yakni bahwa terdapat induksi fluks momentum dari troposfer (Coy dan Pawson, 2015). Hasil yang menarik adalah pola perubahan N^2 dan u di awal Januari 2013 berbeda dengan dua kejadian sebelumnya. Pada saat puncak kejadian SSW, tampak bahwa baik N^2 dan u mengalami perubahan secara drastis dan perubahan nilai kedua parameter tersebut berlangsung sampai minggu ketiga Januari 2013.



Gambar 3-1: Deret waktu rerata zonal u' (kurva biru) dan T' (kurva merah)



Gambar 3-2 Rerata zonal N^2 (panel atas) dan u (panel bawah) di lintang $65^\circ - 90^\circ \text{LU}$

Diagram waktu terhadap lintang rerata zonal (Gambar 3-3) memperlihatkan nilai N^2 di ketinggian 15 mb dan u di 10 mb. Terlihat jelas bahwa N^2 mengalami peningkatan mencapai $5 \times 10^{-4} (\text{rad/s})^2$ sesaat sebelum terjadi penurunan hingga $4,4 \pm 0,1 \times 10^{-4} (\text{rad/s})^2$ pada tanggal 4 dan 26 Desember 2012. Fase ini terjadi bersamaan dengan perubahan rerata u positif menjadi negatif 10-20 m/s di lintang tinggi. Stabilitas statis lapisan stratosfer menurun drastis di lintang tinggi $65^\circ - 90^\circ \text{LU}$ hingga $4,1 \pm 0,1 \times 10^{-4} (\text{rad/s})^2$ pada saat kejadian SSW tanggal 7 Januari 2013 beriringan dengan perubahan drastis rerata angin baratan menjadi angin timuran yang mencapai 30 m/s. Kondisi stabilitas statis menurun secara perlahan hingga pada minggu ketiga Januari 2013 melebar ke wilayah lintang tengah sekitar 45°LU . Dinamika penurunan stabilitas lapisan stratosfer terjadi bersamaan dengan degradasi pelemahan angin zonal.

Dua kejadian perubahan stabilitas statis seiring dengan pelemahan angin zonal di bulan Desember 2012 memastikan hasil analisis gangguan atmosfer (Attard

dkk., 2016; Coy dan Pawson, 2015). Penjelasan mekanisme fisiknya adalah sebagai berikut. Ketika stabilitas statis meningkat sesaat sebelum terjadi perlambatan angin baratan, aktivitas gelombang atmosfer meningkat hingga terjadi saturasi gelombang (Fritts dkk., 2003; Alexander dkk., 2010). Aliran momentum gelombang akan menyimpan energi yang terserap oleh angin baratan sampai kemudian terjadi turbulensi atau pecah gelombang. Turbulensi atau pecah gelombang akan menurunkan stabilitas statis atmosfer yang diwakili oleh penurunan N^2 .

Martineau dan Son (2013) menemukan bahwa pelemahan angin rerata zonal terjadi berkaitan dengan SSW. Kejadian SSW pada tanggal 7 Januari 2013 terlihat jelas merambat dari lintang tinggi dan mengganggu rerata u di lintang tengah. Hal yang menarik adalah tampak terjadi perubahan sirkulasi di lintang menengah ($30^\circ - 45^\circ \text{LU}$) hingga wilayah sub-tropis ($15^\circ - 30^\circ \text{LU}$) selama periode pertengahan Januari 2013. Akan tetapi, stabilitas statis pada lintang $15^\circ - 45^\circ \text{LU}$ menunjukkan tidak ada perubahan

yang berarti, meskipun terdapat sedikit perubahan nilai N^2 pada akhir Januari 2013 di wilayah ekuator (Gambar 3-3 panel kiri).

3.2 Gangguan Atmosfer terkait Kejadian SSW

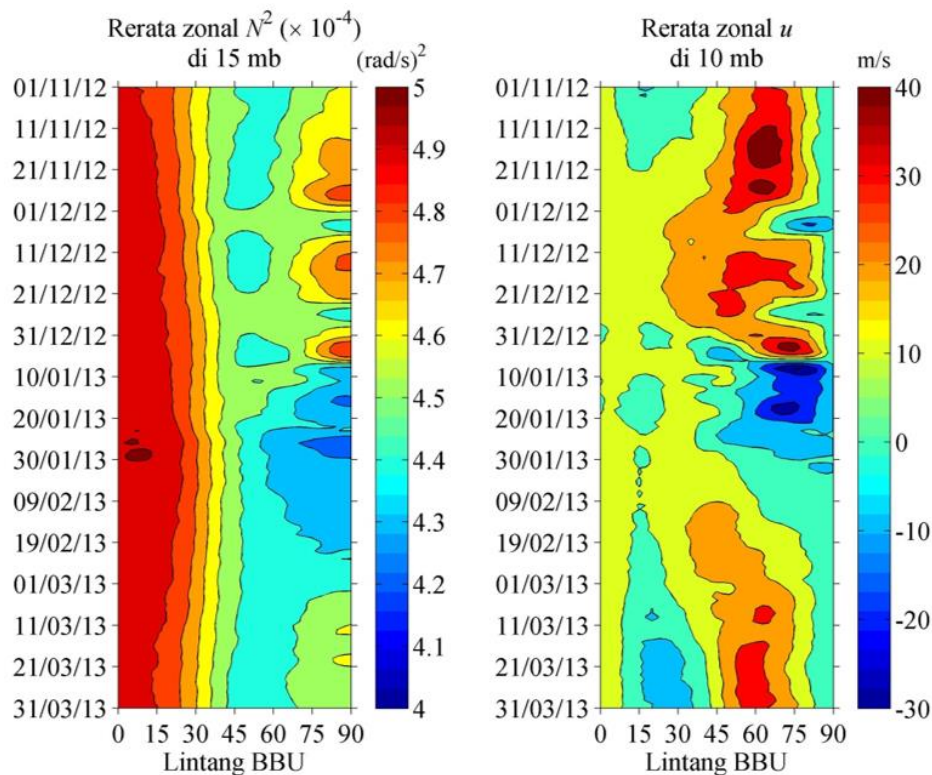
Pada bagian ini akan diuraikan pola gangguan atmosfer sebelum, pada saat, dan setelah kejadian SSW. Dua kejadian penurunan stabilitas statis bersamaan dengan anomali angin zonal pada tanggal 4 dan 26 Desember 2012 dikategorikan sebagai gangguan yang memicu SSW pada 7 Januari 2013. Gambaran variasi dalam bidang horizontal terkait setelah kejadian SSW diambil pada tanggal 24 Januari 2013 yang mana sekitar periode tersebut terjadi sedikit peningkatan stabilitas statis di wilayah tropis (lihat kembali Gambar 3-3 panel kiri).

Kontur N^2 di 15 mb dan u di 10 mb pada bidang horizontal polar stereografik 180 °BB-180 °BT dan 0 ° -90 °LU ditampilkan dalam Gambar 3-4(a)-(d). Gambar 3-4(a) dan (b) menggambarkan dua kondisi perubahan N^2 di bulan Desember 2012 yang bersesuaian dengan perubahan u sebelum puncak kejadian SSW pada tanggal 7 Januari 2013 (Gambar 3-4c). Pada waktu kejadian sebelum puncak SSW terlihat bahwa wilayah seperti Kanada bagian utara, Pegunungan Greenland (4 Desember 2012) dan Perbukitan Aleutian (26 Desember 2012) menunjukkan nilai N^2 tinggi bertepatan dengan pelemahan angin zonal (zona $u = 0$ m/s). Kondisi N^2 rendah dan $u = 0$ m/s terlihat di wilayah utara Samudera Pasifik. Mulai dari anomali pada bulan Desember 2012 sampai dengan akhir Januari 2013, pusat N^2 rendah (kontur warna biru pada Gambar 3-4(a) dan (b) di sekitar kutub utara, memperlihatkan pola perpindahan zona N^2 rendah dari sekitaran lintang 65 °LU belahan bumi bagian timur menuju ke

lintang lebih tinggi dan kemudian mencapai belahan bumi bagian barat sampai di sekitar Kanada utara (Gambar 3-4d). Pada masa puncak SSW dan periode setelahnya (24 Januari 2013), terlihat bahwa kondisi stabilitas statis terganggu dan terlihat merata di lintang tengah dengan nilai N^2 $4,5 - 4,8 \times 10^{-4}$ (rad/s)². Apabila dibandingkan antara kondisi stabilitas statis pada tanggal 26 Desember 2012 dan 24 Januari 2013, maka wilayah tropis sekitar 90°-180°E (Benua Maritim Indonesia dan Samudera Pasifik) mengalami perubahan nilai N^2 .

Zona $u = 0$ m/s (titik kritis) menandakan terjadi pembalikan vektor angin horizontal akibat interaksi fasa gelombang dengan angin dominan (Alexander dkk., 2010). Dengan kata lain pada titik kritis tersebut terdapat aktivitas gelombang planeter atau gelombang gravitas. Proses fisis yang mungkin terjadi pada N^2 tinggi di lokasi yang sama dengan $u = 0$ m/s adalah gelombang planeter atau gelombang gravitas merambat ke atas. Sedangkan pada lokasi N^2 rendah dan $u = 0$ m/s, terjadi turbulensi (pergolakan massa udara) atau resonansi gelombang (Birner dan Williams, 2008; Albers dan Birner, 2014).

Ern dkk., (2014) mengungkapkan bahwa peningkatan aktivitas gelombang di stratosfer terjadi di sekitar titik kritis ($u = 0$ m/s). Energi gelombang gravitas yang bersumber dari pegunungan di wilayah Greenland, Aleutian, dan bagian utara Kanada merambat ke atas yang dipandu oleh perpindahan arus jet baratan dari lapisan stratosfer bagian bawah ke tengah dan mengarah ke utara (Alexander dkk., 2009). Gelombang gravitas ini akan mencapai keadaan saturasi dan secara perlahan menurunkan stabilitas statis lapisan stratosfer itu sendiri karena terjadi efek non linier (turbulensi) sampai kemudian menaikkan temperatur (Martineau dan Son, 2013; Manney dkk., 2015).



Gambar 3-3: Rerata zonal N^2 yang diturunkan dari data temperatur pada ketinggian 20 mb dan 10 mb (panel kiri) dan rerata zonal angina horizontal komponen barat-timur di ketinggian 10 mb (panel kanan)

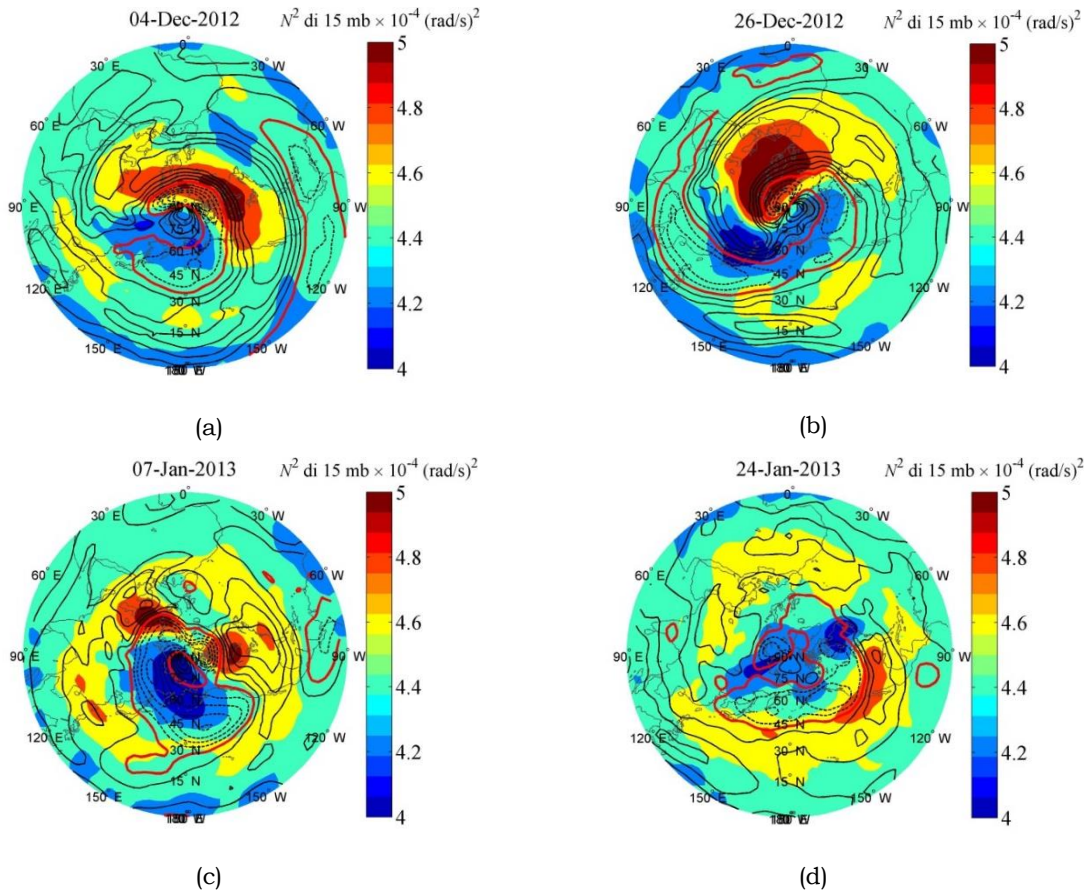
3.3 Dampak Kejadian SSW terhadap Aktivitas Konvektif di atas wilayah Indonesia

Setelah menganalisis variasi N^2 secara global, penjabaran analisis di bagian ini akan lebih fokus pada penampang melintang estimasi total energi potensial gelombang gravitas (Persamaan 2-5) dan pusaran angin dalam batas 90° - 140° BT. Gambar 3-5 menunjukkan diagram ketinggian terhadap lintang distribusi Ep , $\partial u/\partial z$, dan $\partial u/\partial y$ pada waktu yang dipilih seperti dalam Gambar 3-4. Satuan $\partial u/\partial z$ dan $\partial u/\partial y$ berturut-turut dalam m/s per mb dan m/s per rad. Berdasarkan hasil perkalian silang vektor gradien dan angin horizontal ($-\partial u/\partial z \mathbf{j} + \partial u/\partial y \mathbf{k}$), maka nilai positif (negatif) $\partial u/\partial z$ menunjukkan vektor ke atas (bawah), sedangkan nilai positif (negatif) dari $\partial u/\partial y$ mewakili vektor ke selatan (utara). Batas ketinggian meliputi lapisan troposfer dan stratosfer untuk memperlihatkan dampak yang terlihat di troposfer lintang menengah dan ekuator setelah kejadian SSW.

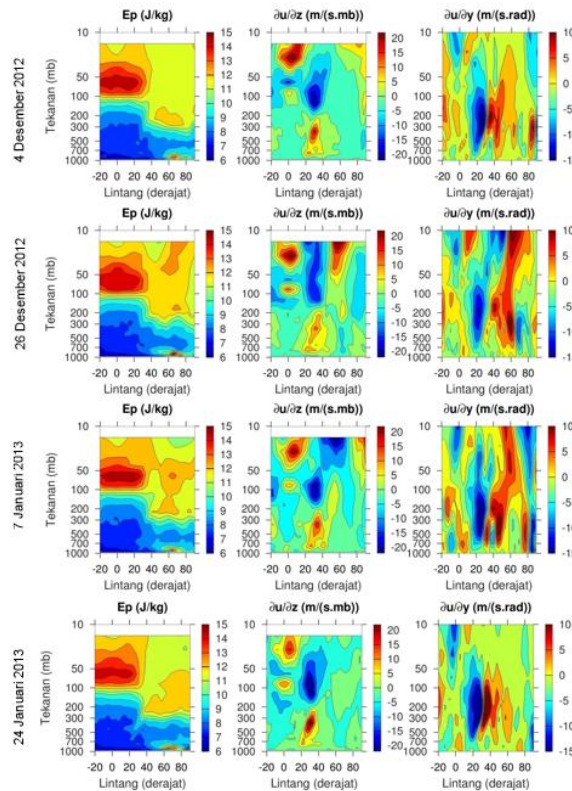
Sumbu horizontal dibatasi dari 20° LS sampai 90° LU karena penelitian ini hanya menganalisis dinamika di BBU.

Nilai Ep pada lintang 40° - 90° LU di atas 100 mb tanggal 4 Desember 2012 sekitar 11 J/kg. Peningkatan Ep mencapai 12-13 J/kg terjadi pada 26 Desember 2012 bersamaan dengan perubahan secara drastis pola pusaran angin di 40° - 60° LU yang mencapai ± 20 m/(s.mb) dan ± 10 m/(s.rad). Perubahan drastis pada tanggal 26 Desember 2012 ini telah diinvestigasi oleh Attard dkk. (2016) yang merupakan pemicu kejadian SSW pada tanggal 7 Januari 2013.

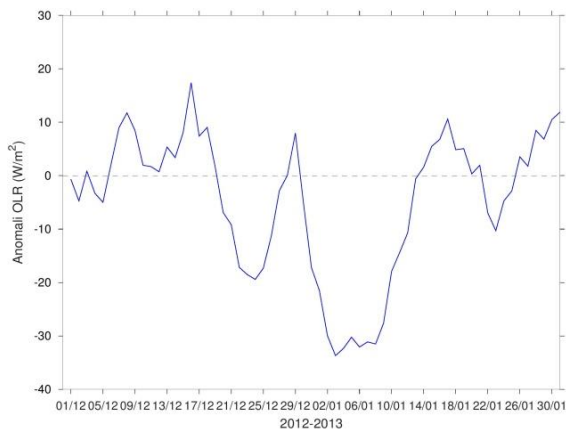
Diagram melintang $\partial u/\partial y$ di sekitar 60° - 80° LU paras 50-10 mb pada saat kejadian SSW menunjukkan pola kebalikan pada tanggal 26 Desember 2012. Negatif $\partial u/\partial z$ dan positif $\partial u/\partial y$ di lapisan stratosfer di lintang menengah menggambarkan ada aliran ke bawah dan menuju tropis. Aktivitas gelombang gravitas yang ditunjukkan oleh Ep juga meningkat di lintang menengah sekitar 100-50 mb.



Gambar 3-4: Diagram polar stereografik N^2 di 15 mb (kontur warna) dan u di 10 mb (kontur garis hitam) dengan interval tiap 10 m/s, angin baratan (timuran) diwakili oleh garis penuh (garis putus-putus). Kontur garis merah menunjukkan zona $u = 0$ m/s



Gambar 3-5: Diagram ketinggian terhadap lintang distribusi energi potensial gelombang gravitas dan pusaran angin dalam batas 90°-140° BT pada waktu yang dipilih sesuai dengan Gambar 3-4



Gambar 3-6: Anomali OLR (nilai OLR dikurangi reratanya) di atas wilayah 90°-140° BT dan 10°LS-10°LU.

Dampak kejadian SSW terhadap wilayah sub-tropis dan tropis mulai terlihat pada tanggal 24 Januari 2013. *Ep* di sekitar 20°-30° LU pada paras 100-200 mb menunjukkan pola yang disebut pelipatan lapisan tropopause (*tropopause folding*) (Fueglistaler dkk., 2009; Gettleman dkk., 2011). Desakan terhadap lapisan tropopause di wilayah sub-tropis ini kemudian memicu anomali aktivitas konvektif di atas wilayah Indonesia (Gambar 3-6). Korelasi silang anomali angin zonal di 10 mb terhadap anomali OLR menunjukkan positif dengan keterlambatan sekitar 15 hari (Kodera, 2006). Anomali negatif OLR di antara tanggal 22-26 Januari 2013 hanya mencapai 10 W/m² lebih kecil daripada yang terjadi pada awal Januari 2013 yang mencapai lebih dari -30 W/m². Meskipun anomali negatif pada akhir Januari 2013 ini dapat juga dipengaruhi oleh kondisi lokal dan juga oleh fasa monsun Asia-Australia dan *Madden Julian Oscillation* (MJO) (Kiladis dkk., 2014), namun kejadian SSW pada bulan Januari 2013 ini memiliki kontribusi sebesar 20%, yakni hasil korelasi silang deret waktu anomali angin zonal di 10 mb (Gambar 3-1) terhadap anomali OLR.

Hasil penelitian ini merupakan temuan dari analisis studi kasus SSW *major* pada bulan Januari 2013 (berdasarkan kategori Butler dkk., 2015). Hasil kuantitatif ini perlu dilakukan uji statistik dari kejadian SSW *major* dan *minor* menggunakan data klimatologi

untuk melihat perbedaan pengaruh kedua tipe SSW tersebut terhadap aktivitas konvektif di wilayah tropis. Interaksi SSW *major* (*minor*) yang lebih identik dengan pemisahan/*split* (*perpindahan/displacement*) pusaran angin terhadap gangguan atmosfer di wilayah tropis seperti *Quasi Biennial Oscillation* (QBO) dan *Madden-Julian Oscillation* (MJO) (Garfinkel dkk., 2012; Liu dkk., 2014) juga perlu dipertimbangkan untuk melihat dampak timbal balik lapisan troposfer-stratosfer.

4 KESIMPULAN

Dinamika lapisan stratosfer BBU selama masa pra, saat, dan pasca kejadian SSW di bulan Januari 2013 telah diteliti berdasarkan data *T* dan *u* dari *NCEP-DOE Reanalysis II*. Analisis dinamika stabilitas statis, energi potensial gelombang gravitas dan pusaran angin dipilih pada tanggal 4 dan 26 Desember 2012 yang dikategorikan sebagai periode sebelum puncak SSW tanggal 7 Januari 2013. Adapun penjabaran kondisi pasca kejadian SSW merujuk pada tanggal 24 Januari 2013.

Hasil penelitian memperlihatkan peningkatan dan penurunan secara drastis dalam waktu singkat pada *N²* terjadi bersamaan dengan perubahan rerata angin baratan menjadi timuran di awal dan minggu ketiga Desember 2012 yang menjadi pemicu kejadian SSW. Pada masa puncak SSW, *N²* menurun secara drastis di wilayah kutub utara bertepatan dengan pelemahan angin zonal. Pada saat kejadian SSW tanggal 7 Januari 2013 terdapat aliran dari kutub menuju tropis dan berdampak terjadi pelipatan lapisan tropopause di wilayah sub-tropis pada tanggal 24 Januari 2013. Pelipatan lapisan tropopause ini kemudian memicu aktivitas konvektif di atas wilayah Indonesia antara tanggal 22-26 Januari 2013. Kontribusi kejadian SSW di BBU terhadap aktivitas konvektif di atas wilayah Indonesia sebesar 20%. Nilai prosentase ini memperlihatkan proses interaksi lapisan stratosfer-troposfer dan telekoneksi wilayah kutub dan tropis.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Prof. Toshitaka Tsuda atas diskusi mengenai dinamika stratosfer. Data *NCEP-DOE Reanalysis II* diperoleh dari NOAA/OAR/ESRL PSD, Boulder, Colorado, USA (www.esrl.noaa.gov), serta Tim Redaksi Jurnal Sains Dirgantara dan Mitra Bestari.

DAFTAR RUJUKAN

- Albers, J. R., dan T., Birner, 2014. *Vortex Preconditioning due to Planetary and Gravity Waves prior to Sudden Stratospheric Warmings*. *J. Atmos. Sci.*, 71, 4028–4054, doi:10.1175/JAS-D-14-0026.1.
- Alexander, M.J., M., Geller, C., Mc-Landress, S., Polavarapu, P., Preusse, F., Sassi, K., Sato, S., Eckermann, M., Ern, A., Hertzog, Y., Kawatani, M., Pulido, T., Shaw, M., Sigmond, R., Vincent, S., Watanabe, 2010. *Recent Developments in Gravity-Wave Effects in Climate Models and the Global Distribution of Gravity-Wave Momentum Flux From Observations and Models*, Q. J. R. Meteorolog. Soc., 136, 1103–1124, doi:10.1002/qj.637.
- Alexander, S.P., A.R., Klekociuk, dan T., Tsuda, 2009. *Gravity Wave and Orographic Wave Activity Observed Around the Antarctic and Arctic Stratospheric Vortices by the COSMIC GPS-RO Satellite Constellation*. *J. Geophys. Res.* 114, doi: 10.1029/2009JD011851.
- Alexander, S.P., T., Tsuda, dan Y., Kawatani, 2008. *COSMIC GPSRO Observations of Northern Hemisphere Winter Stratospheric Gravity Waves and Comparisons with an Atmospheric General Circulation Model*. *Geophys. Res. Lett.*, 35, L10808, doi:10.1029/2008GL033174.
- Andrews, D. G., J. R., Holton, dan C. B., Leovy, 1987. *Middle Atmosphere Dynamics*. Academic Press, 489.
- Attard, H. E., R.-B., Rosimar, T. G., Corey, dan L. L., Andrea, 2016. *Tropospheric and Stratospheric Precursors to the January 2013 Sudden Stratospheric Warming*. *Mon. Weather Rev.*, 1321-1339.
- Austin, J., dan T. J. Reichler, 2008. *Long-Term Evolution of the Cold Point Tropical Tropopause: Simulation Results and Attribution Analysis*, *J. Geophys. Res.*, 113, D00B10, doi: 10.1029/2007JD009768.
- Birner, T., dan P. D., Williams, 2008. *Sudden Stratospheric Warmings as Noise-Induced Transitions*. *J. Atmos. Sci.*, 65, 3337–3343, doi:10.1175/2008JAS2770.1.
- Butler, A. H., D. J., Seidel, S. C., Hardiman, N., Butchart, T. Birner, dan A. Match, 2015. *Defining Sudden Stratospheric Warmings*. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 96, 1913–1928, doi:10.1175/BAMS-D-13-00173.1.
- Charlton, A. J., dan L. M., Polvani, 2007. *A New Look at Stratospheric Sudden Warmings. Part I: Climatology and Modeling Benchmarks*. *J. Climate*, 20, 449–469, doi:10.1175/JCLI3996.1.
- Coy, L., dan S., Pawson, 2015. *The Major Stratospheric Sudden Warming of January 2013: Analyses and Forecasts in the GEOS-5 Data Assimilation System*. *Mon. Wea. Rev.*, 143, 491–510, doi: 10.1175/MWR-D-14-00023.1.
- Ern, M., F., Ploeger, P., Preusse, J. C., Gille, L. J., Gray, S., Kalisch, M. G., Mlynczak, J. M., Russell III, dan M., Riese, 2014. *Interaction of Gravity Waves with The QBO: a Satellite Perspective*, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 119, 2329–2355, doi: 10.1002/2013JD020731.
- Fritts, D. C., dan Alexander, M. J., 2003. *Gravity Wave Dynamics and Effects in the Middle Atmosphere*, *Rev. Geophys.*, 41, 1003, doi:10.1029/2001RG000106.
- Fritts, D. C., dan P. K., Rastogi, 1985. *Convective and Dynamical Instabilities due to Gravity Wave Motions in the Lower and Middle Atmosphere: Theory and Observations*, *Radio Sci.*, 20, 1247–1277.
- Fueglistaler, S., A. E., Dessler, T. J., Dunkerton, I., Folkins, Q., Fu, dan P. W., Mote, 2009. *Tropical Tropopause Layer*, *Rev. Geophys.*, 47, RG1004, doi:10.1029/2008RG000267.
- Garfinkel, C. I., S. B., Feldstein, D. W., Waugh, dan C., Yoo, S., Lee, 2012. *Observed Connection between Stratospheric Sudden Warmings and the Madden-Julian Oscillation*. *Geophys. Res. Lett.*, 39, L18807, doi:10.1029/2012GL053144.
- Gottelman, A., P., Hoor, L., Pan, W. J., Randel, M. I., Hegglin, dan T., Birner, 2011. *The Extratropical Upper Troposphere and*

- Lower Stratosphere, Rev. Geophys., 49, RG3003, doi:10.1029/2011RG000355.
- Griise, K. M., D. W. J., Thompson, dan T., Birner, 2010. *A Global Survey of Static Stability in the Stratosphere and Upper Troposphere*, J. Clim., 23, 2275–2292.
- Hei, H., T., Tsuda, dan T., Hirooka, 2008. *Characteristics of Atmospheric Gravity Wave Activity in the Polar Regions Revealed by GPS Radio Occultation Data with CHAMP*, J. Geophys. Res., 113, D04107, doi:10.1029/2007JD008938.
- Holton, J.R., 2004. *An Introduction to Dynamic Meteorology*, Elsevier Academic Press.
- Kanamitsu, M., W. Ebisuzaki, J. Woollen, S-K Yang, J.J., Hnilo, M. Fiorino, dan G. L., Potter, 2002. NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2). Bull. Amer. Meteor. Soc. 1631-1643.
- Kiladis, G.N., J., Dias, K.H., Straub, M.C., Wheeler, S.N., Tulich, K., Kikuchi, K.M., Weickmann, M.J., Ventrice, 2014. *A Comparison of OLR and Circulation Based Indices for Tracking the MJO*. Monthly Weather Review, 142 1697-1715.
- Kodera, K., 2006. *Influence of Stratospheric Sudden Warming on the Equatorial Troposphere*. Geophys. Res. Lett., 33, L06804, doi:10.1029/2005GL024510.
- Lindzen, R.S., dan J.R., Holton, 1968. A Theory of the Quashi-Biennial Oscillation. J. Atmos. Sci., 25, 1095-1107.
- Liu, C., B., Tian, K.-F., Li, G. L., Manney, N. J., Livesey, Y. L., Yung, dan D. E., Waliser, 2014. *Northern Hemisphere Mid-Winter Vortex-Displacement and Vortex-Split Stratospheric Sudden Warmings: Influence of The Madden-Julian Oscillation and Quasi-Biennial Oscillation*. J. Geophys. Res. Atmos., 119, 12 599–12 620, doi: 10.1002/2014JD021876.
- Manney, G.L., Z. D., Lawrence, M. L., Santee, W., G., Read, N. J., Livesey, A., Lambert, L., Froidevaux, H. C., Pumphrey, and M.J., Schwartz, 2015. *A Minor Sudden Stratospheric Warming With a Major Impact: Transport And Polar Processing In The 2014/2015 Arctic Winter*, Geophys. Res. Lett., 42, 7808–7816, doi: 10.1002/2015GL065864.
- Martineau, P., dan S.-W., Son, 2013. *Planetary-Scale Wave Activity as a Source of Varying Tropospheric Response to Stratospheric Sudden Warming Events: a Case Study*. J. Geophys. Res. Atmos., 118, 10994–11006, doi:10.1002/jgrd.50871.
- McInturff, R. M., 1978. *Stratospheric Warmings: Synoptic, Dynamic and General-Circulation Aspects*. Tech. Rep. NASA-RP-1017, NASA, Washington, DC, 166.
- O'Neill, A., 2003. *Middle Atmosphere: Sudden Stratospheric Warmings*. Encyclopedia of Atmospheric Sciences, J. R. Holton, J. A. Curry, and J. A. Pyle, Eds., Academic, 1342–1353.
- Randell, W.J., dan F. Wu, 2015. *Variability of Zonal Mean Temperatures Derived from a Decade of GPS Radio Occultation Data*. J. Atmos. Sci., 72, 1261-1275, doi: 10.1175/JAS-D-14-0216.1.
- Reichler, T., M., Dameris, dan R., Sausen, 2003. *Determining the Tropopause Height from Gridded Data*, Geophys. Res. Lett., 30(20), 2042, doi:10.1029/2003GL018240.
- Smith, S. A., D. C., Fritts, dan T. E., VanZandt, 1987. *Evidence for a Saturated Spectrum of Atmospheric Gravity Waves*, J. Atmos. Sci., 44, 1404–1410.
- Tsuda, T., 2014. *Characteristics of Atmospheric Gravity Waves Observed using The MU (Middle and Upper Atmosphere) Radar and Global Positioning System (GPS) Radio Occultation*. Review. Proc. Jpn. Acad., Ser. B 90, 12-27.
- Tsuda, T., K., Hocke, 2002. *Vertical Wave Number Spectrum of Temperature Fluctuations in the Stratosphere using GPS Occultation Data*, J. Meteorol. Soc. Japan, 80, 925–938.
- Tsuda, T., M., Nishida, C., Rocken, and R. H., Ware, 2000. *A Global Morphology of Gravity Wave activity in the Stratosphere Revealed by the GPS Occultation Data GPS/MET*, J. Geophys. Res., 105(D6), 7257–7273.
- Tsuda, T., T. E., VanZandt, M., Mizumoto, S., Kato, dan S., Fukao, 1991. *Spectral Analysis of Temperature and Brunt-Vaisala Frequency Fluctuations Observed by Radiosondes*, J. Geophys. Res., 96, 17265–17278.
- VanZandt, T. E., 1982. *A Universal Spectrum of Buoyancy Waves in the Atmosphere*, Geophys. Res. Lett., 9, 575–578.

MODEL BADAI IONOSFER INDONESIA TERKAIT BADAI GEOMAGNET (INDONESIA IONOSPHERIC STORM MODEL RELATED TO GEOMAGNETIC STORM)

**Anwar Santoso¹, Mira Juangsih, Sri Ekawati, Iyus Edi Rusnadi, Anton Winarko,
Siska Filawati, Dadang Nurmali**

Pusat Sains Antariksa

Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional

Jalan Dr. Djunjunan 133 Bandung 40173

¹email: anwar.santoso@lapan.go.id; war92_2000@yahoo.com

Diterima 21 April 2017; Direvisi 12 Desember 2017; Disetujui 9 Januari 2018

ABSTRACT

Knowledge about the ionospheric response to the geomagnetic storms is needed to support SWIFtS activity in Space Science Center-LAPAN. However, it is difficult to predict its behavior. As an approach, it needs a model of the ionospheric response to geomagnetic storms. In this paper, the modeling of the Indonesia ionospheric storms to the geomagnetic storm was done by modifying the global empirical models developed by Araujo-Pradere. By using ap index data, Dst index, and foF2 ionosphere from BPAA Sumedang of 2005-2015, it was obtained the Indonesia ionospheric storms model related to the geomagnetic storm. The analysis result showed that the Sumedang ionospheric storms model had a deviation or error < 40% of the data. Therefore it can be concluded that this models can be used to support the SWIFtS activity in Space Science Center-LAPAN for future space weather conditions.

Keywords: foF2 ionospheric response, geomagnetic storm, Indonesia ionospheric storm model

ABSTRAK

Pengetahuan tentang respon ionosfer terhadap badai geomagnet sangat diperlukan untuk mendukung kegiatan SWIFtS di Pusat Sains Antariksa-LAPAN. Namun, sulit diprediksi perilakunya. Sebagai pendekatan, diperlukan sebuah model respon ionosfer terhadap badai geomagnet. Dalam makalah ini, dilakukan pemodelan badai ionosfer Indonesia terkait badai geomagnet dengan memodifikasi model empiris global yang telah dikembangkan oleh Araujo-Pradere. Dengan menggunakan data indeks a_p , indeks Dst dan foF2 ionosfer BPAA Sumedang tahun 2005-2015 diperoleh model badai ionosfer regional Indonesia terhadap badai geomagnet. Dari analisis disimpulkan bahwa model badai ionosfer Sumedang tersebut memiliki simpangan atau kesalahan < 40% terhadap data. Hal ini menunjukkan bahwa model badai ionosfer Sumedang tersebut dapat dipergunakan untuk mendukung kegiatan SWIFtS di Pusat Sains Antariksa-LAPAN sebagai bahan pertimbangan dalam memprediksi kondisi cuaca antariksa akan datang.

Kata Kunci: *respon foF2 ionosfer, badai geomagnet, model badai ionosfer Sumedang*

1 PENDAHULUAN

Seperti diketahui bahwa Matahari merupakan sumber penggerak cuaca antariksa. Salah satu fenomenadi Matahari yang menjadi sumber penggerak cuaca antariksa adalah *Coronal Mass Ejection* (CME) atau dinamakan juga peristiwa ledakan Matahari. Ketika CME terjadi, energi dan partikel-partikel bermuatan terbawa oleh angin surya (*solar wind*) akan diinjeksikan ke dalam magnetosfer melalui mekanisme rekoneksi. Energi dan momentum tersebut akan menimbulkan perubahan sistem arus listrik di dalam magnetosfer dan ionosfer (Russell, 2006; Gopalswamy, 2009). Kopling magnetosfer-ionosfer sangat perlu dipahami karena gangguan medan magnet menjalar dari ruang antar-planet, melewati magnetosfer dan ionosfer hingga mencapai permukaan Bumi.

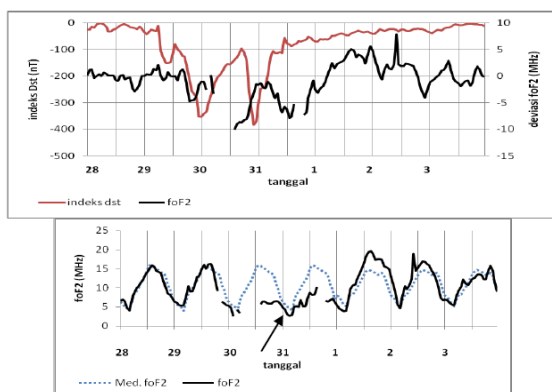
Perilaku ionosfer selama kondisi geomagnet tenang telah diketahui dengan baik dan bahkan telah dimodelkan oleh *International Reference Ionosphere* (IRI) (Bilitza, 1990). Namun, pengetahuan tentang respon ionosfer selama badai geomagnet dan proses-proses yang terkait di dalamnya tetap belum sepenuhnya dipahami. Walaupun belum sepenuhnya dipahami, beberapa studi yang dikhususkan untuk pemodelan (empiris dan numerik) respon ionosfer terhadap badai geomagnet telah cukup

banyak dilakukan. Salah satunya adalah model empiris badai ionosfer terhadap badai geomagnet oleh Araujo-Pardere *et al.* (2002) yang dalam makalah ini akan diadopsi sebagai model badai ionosfer regional Indonesia terhadap badai geomagnet. Penggunaan pemodelan numerik untuk deskripsi respon ionosfer terhadap badai geomagnet memungkinkan penyelidikan mekanisme fisis yang bertanggung jawab atas gangguan ionosfer. Sedangkan penggunaan pemodelan empiris respon ionosfer terhadap badai geomagnet berguna untuk keperluan praktis.

Badai ionosfer merupakan gangguan terhadap ionosfer sebagai respon dari badai geomagnet. Respon ionosfer tidak terjadi secara langsung melainkan melalui proses kopling magnetosfer-ionosfer. Rastogi (1999), dalam Yatini *et al.*, (2009) telah melaporkan bahwa selang waktu antara munculnya badai geomagnet dan gangguan ionosfer adalah sekitar 20 jam. Lusiani *et al.* (2011) menggunakan data indeks Dst dan foF2 Loka Pengamatan Dirgantara (LPD) LAPAN Sumedang bulan Oktober-November 2003 (Gambar 1-1), juga telah melaporkan bahwa semakin kuat badai geomagnet, semakin cepat respon dari ionosfer untuk terjadinya badai geomagnet ionosfer. Badai ionosfer dapat terjadi dalam selang waktu satu sampai 4 jam

setelah kejadian badai geomagnet kuat. Badai geomagnet menengah mengakibatkan badai ionosfer dalam selang waktu satu sampai 10 jam setelah badai geomagnet menengah tersebut. Sedangkan badai geomagnet lemah mengakibatkan badai ionosfer yang terjadi dalam selang waktu lebih dari 10 jam setelah badai geomagnet lemah tersebut.

Zhao *et al.* (2009) menyatakan bahwa panjangnya durasi waktu tersebut berkaitan dengan waktu berlangsungnya proses berkurang dan bertambahnya rasio (O/N₂). Selama fase pemulihan, badai negatif teramati di lintang menengah-rendah dan bertahan selama 2-3 hari, disebabkan oleh berkurangnya (O/N₂).



Gambar 1-1: Variasi indeks Dst terhadap deviasi foF2 pada rentang waktu 28 Oktober – 3 November 2003 (*atas*) Variasi nilai foF2 (garis penuh) terhadap mediannya (garis putus-putus) dan tanda panah menunjukkan kejadian badai ionosfer negatif (*bawah*) (Lusiani *et al.*, 2011)

Kondisi ionosfer setelah badai diperlukan untuk mendukung kegiatan harian *Space Weather Information and Forecast Services* (SWIFtS). Kondisi ionosfer yang dimaksud di antaranya depresi foF2 terhadap mediannya, durasi waktu berlangsungnya gangguan ionosfer (onset dan maksimum gangguan) akibat badai geomagnet.

Dalam makalah ini, validasi respon ionosfer Indonesia terhadap badai geomagnet dengan mengadopsi model

dari Araujo-Pardere *et al.* (2002) menggunakan masukan indeks Dst atau indeks ap tahun 2005-2015 dan pemodelan statistik respon ionosfer Sumedang (foF2_{SMD}) terhadap badai geomagnet (Dst). Tujuan dari pemodelan badai ionosfer ini adalah mendapatkan model badai ionosfer di Indonesia menggunakan data Dst dan foF2 Sumedang. Hasilnya akan digunakan untuk menunjang kegiatan SWIFtS di Pusat Sains Antariksa, Desain-LAPAN.

2 DATA DAN METODE

2.1 Data

Data medan geomagnet (indeks K) dan foF2 ionosfer dari BPAA Sumedang (BPAA SMD: 6,91° LS; 106,83° BT koordinat geografis atau 16,55° LS; BT 179,95° koordinat magnet) serta indeks Dst dan indeks ap tahun 2005 sampai 2015 kecuali tahun 2006 dan 2009 karena data geomagnet kosong.

Adapun level gangguan ionosfer (Badai ionosfer) yang didefinisikan dalam kegiatan SWIFtS diberikan dalam Tabel 2-1.

Tabel 2-1: DAFTAR KLASIFIKASI TINGKAT GANGGUAN IONOSFER (foF2) DALAM SWIFtS PUSAINSA

No	Kondisi Ionosfer	Φ	Durasi Berlangsungnya
1	Quite (Tenang)	$-30\% < \Phi < 30\%$	
2	Minor (mulai terganggu)	$\Phi > 30\%$	<10 menit
3	Moderate (badai lemah)	$\Phi > 30\%$	<60 menit
4	Strong (Badai Kuat)	$\Phi > 30\%$	<120 menit
5	Severe storm (Badai sangat kuat)	$\Phi > 30\%$	<240 menit

Indeks Dst untuk identifikasi kejadian badai geomagnet kelas moderat (Dst < -79,3 nT) dan sekaligus untuk masukan pemodifikasian model Araujo-Pradere *et al.* (2002). Klasifikasi badai

geomagnet berdasarkan indeks Dst yang menjadi standard kegiatan SWIFts diberikan pada Tabel 2-2.

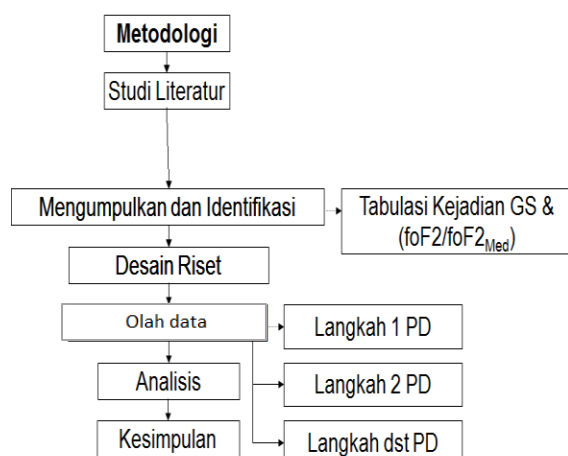
Tabel 2-2: KLASIFIKASI INTENSITAS BADAI GEOMAGNET BERDASARKAN INDEKS Dst

No	Kondisi Geomagnet	Indeks K	Durasi Berlangsungnya
1	Quite (Tenang)	1-3	≤ 25,4
2	Active (aktif)	4	-25,5 – (-44,9)
3	Minor Storm (badai lemah)	5	-45 – (-79,2)
4	Moderate storm (Badai sedang)	6	-79,3 – (-139,6)
5	Major storm (Badai kuat)	7	-139,7 – (-245,9)
6	Severe storm (Badai sangat kuat)	≥ 8	≥ 246

2.2 Metodologi

2.2.1 Model empiris respon ionosfer (foF2) terhadap badai geomagnet

Alur tahapan pekerjaan yang dilakukan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 2-1.



Gambar 2-1: Diagram alur tahapan metodologi kegiatan

Model empiris yang paling banyak digunakan adalah IRI, model standar empiris ionosfer, awalnya dibangun dengan berdasarkan data tahun 1950-1975 dan kemudian diperbarui secara berkala. Untuk lokasi tertentu, waktu dan

tanggal, IRI menggambarkan kerapatan elektron, suhu elektron, suhu ion, dan komposisi ion di ketinggian dari sekitar 50 km ke sekitar 2000 km (seperti halnya juga kandungan total elektron (TEC). Hal Ini memberikan rata-rata bulanan ionosfer non-aurora saat kondisi geomagnet tenang (Rawer *et al.*, 1978). Versi terbaru dari IRI yakni IRI 2000 (Bilitza, 2001) meliputi model STORM sebagai koreksi untuk kondisi terganggu. Riset terbaru telah memberikan beberapa wawasan dan pemahaman terhadap beberapa dependensi respon ionosfer terhadap aktivitas geomagnet seperti yang diharapkan (Rodger *et al.*, 1989; Fuller-Rowell *et al.*, 1996). Hasil penelitian menunjukkan bahwa ionosfer merespon perubahan komposisi termosfer. Berdasarkan penelitian ini maka dikembangkan model empiris respon ionosfer terhadap badai geomagnet dengan input indeks geomagnet a_p (Araujo-Pradere dan Fuller-Rowell, 2000). Algoritma model empiris tersebut diberikan oleh Fuller-Rowell *et al.* (1998) dalam Araujo-Pradere *et al.* (2002):

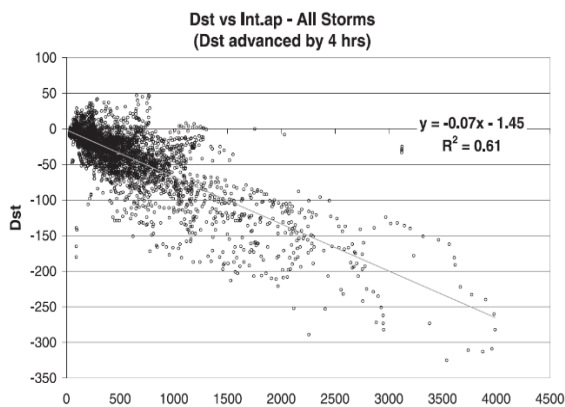
$$\Phi = \{a_0 + a_1X(t_0) + a_2X^2(t_0) + a_3X^3(t_0)\} \{1 + a_4 \sin(LT + \alpha)\} \quad (2-1)$$

$$X(t_0) = \int F(\tau) P(t_0 - \tau) d\tau \quad (2-2)$$

Dengan Φ adalah foF2 pengamatan dibagi foF2 median bulanan (foF2 pengamatan/foF2 median bulanan), $F(\tau)$ adalah fungsi pembobotan filter indeks a_p dan $P(t_0 - \tau)$ adalah jumlah indeks a_p dalam 33 jam sebelumnya. Koefisien a_0 , a_1 , a_2 , dan a_3 diatur untuk menyesuaikan hubungan non-linear antara respon ionosfer dan integral indeks geomagnet a_p .

Model empiris badai ionosfer terhadap badai geomagnet yang dibuat oleh Araujo-Pradere *et al.* (2002) merupakan model badai ionosfer lintang menengah-tinggi karena dibangun menggunakan indeks a_p . Namun, mereka juga memberikan konversi indeks a_p ke indeks Dst (lihat Gambar 2-2)

sehingga dapat diadopsi sebagai model badai ionosfer lintang rendah (masuk indeks Dst). Dengan demikian, model empiris badai ionosfer tersebut dapat dikategorikan sebagai model empiris badai ionosfer global. Dalam Araujo-Pradere *et al.* (2002) juga dinyatakan bahwa untuk meningkatkan akurasi model di lintang menengah maka musim panas dan *equinox* patut dipertimbangkan sebagai faktor koreksi. Tetapi, saat musim dingin dan di lintang rendah, model tidak menunjukkan peningkatan secara signifikan. Untuk mendapatkan peningkatan akurasi yang signifikan di lintang rendah dan ekuator maka disarankan bahwa input model yakni a_p (indeks aktivitas geomagnet lintang menengah) ditransformasi ke dalam indeks Dst dan atau indeks a_k (nilai konversi indeks K dalam satuan nT). Hubungan antara indeks Dst dan integral indeks a_p diberikan pada Gambar 2-2 (Araujo-Pradere *et al.*, 2002).



Gambar 2-2: Korelasi antara indeks Dst dan a_p terfilter (integral a_p)

2.2.2 Respon ionosfer (foF2) terhadap badai geomagnet

Pengaruh badai geomagnet terhadap ionosfer di ekuator dan lintang rendah memiliki fitur yang unik. Hal ini diduga dipengaruhi oleh modifikasi pada *Equatorial ionization anomaly* (EIA), *Equatorial spread-F* (ESF) dan *Equatorial Electrojet* (EEJ) yang diproduksi oleh: (1) gangguan medan listrik yang dihasilkan dari penetrasi medan listrik lintang tinggi menuju ekuator dengan

cepat, (2) gangguan dinamo yang digerakkan oleh peningkatan sirkulasi termosfer global yang dihasilkan dari masuknya energi pada lintang tinggi, dan (3) gangguan angin (zonal dan meridional) yang memodifikasi dinamika termosfer ekuator. Di bawah pengaruh penetrasi yang cepat medan listrik dan gangguan medan listrik dinamo, *Equatorial Ionization Anomaly* (EIA) dapat mengalami modifikasi drastis yang menghasilkan gangguan ionosfer besar di lintang rendah (Abdu *et al.*, 1991; Mukherjee *et al.*, 2010).

Pengaruh badai geomagnet pada ionosfer dapat berupa naiknya nilai foF2 atau turunnya nilai foF2. Naik atau turunnya nilai foF2 ionosfer dari mediannya tersebut dinamakan badai ionosfer. Naiknya nilai foF2 ionosfer dari mediannya dinamakan badai ionosfer positif dan sebaliknya dinamakan badai ionosfer negatif. Pembentukan badai ionosfer positif atau negatif sangat dipengaruhi oleh EEJ, perubahan angin dan komposisi udara netral, yang mengakibatkan perubahan tingkat rekombinasi dan ionisasi. Diketahui, bahwa distribusi plasma di ekuator dan lintang rendah terutama dikontrol oleh drift $E \times B$ melalui *plasma fountain* yang bertanggungjawab terhadap EIA. Selama badai geomagnet, gangguan medan listrik dapat meningkatkan atau menghambat EIA sehingga mengendalikan tingkat rekombinasi dan ionisasi. Respon ionosfer terhadap badai geomagnet dapat dikategorikan menjadi dua yakni deviasi (Φ) adalah nilai foF2 ionosfer terdepresi terhadap mediannya yang dirumuskan sebagai:

$$\Phi_{SMD} = \frac{foF2 \text{ data}}{\text{median } foF2} \quad (2-3)$$

Sedangkan gangguan foF2 ionosfer dilambangkan dengan (δ) dirumuskan menggunakan formulasi:

$$\delta foF2 \text{ SMD} (\%) = \left(\frac{(foF2_{Obs-SMD} - foF2_{Med-SMD})}{foF2_{Med-SMD}} \right) \times 100\% \quad (2-4)$$

Dengan foF2_{Obs-SMD} adalah nilai foF2 ionosfer pengamatan di BPAA Sumedang dan foF2_{Med-SMD} adalah nilai median bulanan foF2 ionosfer di BPAA Sumedang.

Persamaan Araujo-Pradere dan Fuller-Rowell

$$\Phi = \{a_0 + a_1 X(t_0) + a_2 X^2(t_0) + a_3 X^3(t_0)\} \cdot \{1 + a_4 \sin(LT + \alpha)\} \quad (2-5)$$

Karena a₄ sudah ditentukan dan nilai LT dan α merupakan konstanta maka C = 1 + a₄ sin(LT + α), sehingga persamaan (2-5) akan menjadi,

$$\Phi = \{a_0 + a_1 X(t_0) + a_2 X^2(t_0) + a_3 X^3(t_0)\} \cdot C \quad (2-6)$$

X merupakan penjumlahan 33 data indeks Dst. Terdapat empat konstanta yang akan dicari a₀, a₁, a₂, dan a₃, jadi dibutuhkan empat persamaan Φ,

$$\begin{bmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \\ \Phi_3 \\ \Phi_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1^0 & X_1^1 & X_1^2 & X_1^3 \\ X_2^0 & X_2^1 & X_2^2 & X_2^3 \\ X_3^0 & X_3^1 & X_3^2 & X_3^3 \\ X_4^0 & X_4^1 & X_4^2 & X_4^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} C \quad (2-7)$$

Penjabaran persamaan matrik (2-7),

$$\Phi_1 = [a_0 X_1^0 + a_1 X_1^1 + a_2 X_1^2 + a_3 X_1^3] C \quad (2-8a)$$

$$\Phi_2 = [a_0 X_2^0 + a_1 X_2^1 + a_2 X_2^2 + a_3 X_2^3] C \quad (2-8b)$$

$$\Phi_3 = [a_0 X_3^0 + a_1 X_3^1 + a_2 X_3^2 + a_3 X_3^3] C \quad (2-8c)$$

$$\Phi_4 = [a_0 X_4^0 + a_1 X_4^1 + a_2 X_4^2 + a_3 X_4^3] C \quad (2-8d)$$

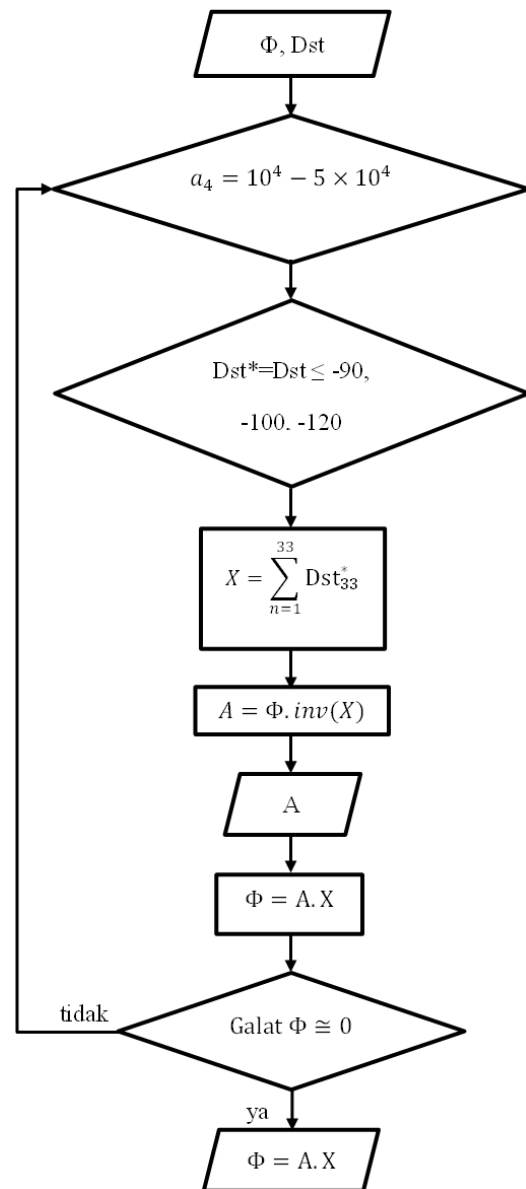
Nilai a₀, a₁, a₂, dan a₃ merupakan hasil eliminasi persamaan (2-8a), (2-8b), (2-8c), dan (2-8d). berdasarkan persamaan (2-7), nilai a₀, a₁, a₂, dan a₃ dapat dihitung dengan menggunakan invers nilai X.

$$\begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{C} \left(inv \begin{bmatrix} X_1^0 & X_1^1 & X_1^2 & X_1^3 \\ X_2^0 & X_2^1 & X_2^2 & X_2^3 \\ X_3^0 & X_3^1 & X_3^2 & X_3^3 \\ X_4^0 & X_4^1 & X_4^2 & X_4^3 \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \\ \Phi_3 \\ \Phi_4 \end{bmatrix} \quad (2-9)$$

Dari persamaan (2-9) dapat diketahui nilai a₀, a₁, a₂, dan a₃.

Konstanta a₀, a₁, a₂, dan a₃ diperoleh dengan melakukan injeksi nilai Φ dan indeks ap perkejadian badai geomagnet untuk a₄ yang ditetapkan. Kemudian ini diiterasi sampai diperoleh nilai a₀, a₁, a₂, dan a₃.

Sedangkan tahapan pengolahan data, alurnya ditunjukkan pada Gambar 2-3.



Gambar 2-3: Diagram alur pengolahan data untuk bahan analisis

Langkah-langkah pengolahan datanya sebagai berikut:

- *Input* data Dst dan Φ tahun 2005-2015,
- Menentukan nilai konstanta a_4 . Nilai a_4 ditentukan dari awal agar memudahkan perhitungan. Berdasarkan persamaan (2-5), nilai a_4 mempengaruhi semua konstanta, sehingga dapat dimisalkan dengan nilai tertentu yang selanjutnya didapatkan konstanta a_0, a_1, a_2 , dan a_3 ,
- Mencari tanggal terjadi badai geomagnet dengan mengkategorikan data indeks Dst $\leq -90, -100, -120$. Dengan tanggal yang sama nilai Φ juga digunakan,
- Menjumlahkan data indeks Dst minimum yang ditemukan dengan data indeks Dst 33 jam sebelum indeks Dst minimum,
- Menghitung nilai konstanta a_0, a_1, a_2 , dan a_3 dengan perhitungan matriks persamaan (2-9),
- Didapatkan nilai konstanta a_0, a_1, a_2 , dan a_3 ,
- Untuk mengetahui apakah nilai konstanta a_0, a_1, a_2 , dan a_3 tepat, maka dilakukan perhitungan ulang nilai konstanta a_0, a_1, a_2 , dan a_3 dengan indeks Dst pada tanggal yang sama apakah akan menghasilkan gangguan Φ dengan nilai yang mendekati,
- Menghitung besar galat Φ antara data dengan hasil perhitungan. Jika galat jauh dari nilai nol, maka perhitungan dimulai dari awal penentuan konstanta a_4 . Namun, jika galat mendekati nol (sangat kecil) maka nilai konstanta a_0, a_1, a_2 , dan a_3 tersebut yang akan dipersiapkan sebagai model.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Model Numerik Φ_{Model} dan δ_{foF2} BPAA Sumedang

Dengan memasukkan nilai Φ BPAA Sumedang pengamatan tahun 2005-2015 dan nilai konstanta $a_4 = 1$ sampai 50000 serta Dst(ap) atau Dst* dan Dst_Kyoto ke dalam Persamaan (2-1) maka diperoleh konstanta a_0, a_1, a_2 dan a_3 , seperti ditunjukkan pada Tabel 3-1.

Tabel 3-1: NILAI KONSTANTA a_0, a_1, a_2, a_3 DAN a_4 YANG DIHITUNG MENGGUNAKAN Dst_Kyoto (Dst*) DAN Φ BPAA SUMEDANG TAHUN 2005-2015

$X = Dst*(50) = -0,07 (JAp) - 145$

	$a_4 = 10000$	$a_4 = 11000$	$a_4 = 12000$
a_0	-0,0415	$a_0 = -0,0377$	$a_0 = -0,0346$
a_1	-0,0012	$a_1 = -0,0011$	$a_1 = 0,0010$
a_2	$-1,095 \times 10^{-5}$	$a_2 = -9,9542 \times 10^{-6}$	$a_2 = -9,1245 \times 10^{-6}$
a_3	$-3,0753 \times 10^{-8}$	$a_3 = -2,7956 \times 10^{-8}$	$a_3 = -2,5626 \times 10^{-8}$
	$a_4 = 18000$	$a_4 = 19000$	$a_4 = 20000$
a_0	-0,0230	$a_0 = -0,0218$	$a_0 = -0,0207$
a_1	$-6,6778 \times 10^{-4}$	$a_1 = -6,3263 \times 10^{-4}$	$a_1 = -6,0099 \times 10^{-4}$
a_2	$-6,0824 \times 10^{-6}$	$a_2 = -5,7622 \times 10^{-6}$	$a_2 = -5,4740 \times 10^{-6}$
a_3	$-1,7082 \times 10^{-8}$	$a_3 = -1,6183 \times 10^{-8}$	$a_3 = -1,5374 \times 10^{-8}$

Jika nilai-nilai konstanta a_0, a_1, a_2, a_3 , dan a_4 pada Tabel 3-1 tersebut diterapkan pada Persamaan (2-1) Araujo-Pradere *et al.* (2002) akan menjadi model Φ_{Model} Araujo-Pradere *et al.* (2002) modifikasi. Contoh persamaan model Φ_{Model} tersebut ditampilkan sebagai berikut:

$$\Phi_{Model} = (0,0017 + ((8,9587 \times 10^{-6}) Dst_{Kyoto}) + ((1,1244 \times 10^{-8}) (Dst_{Kyoto})^2) + ((4,0494 \times 10^{-12}) (Dst_{Kyoto})^3)) \times (1 + 25000 \times (-0,28402)) \quad (3-1)$$

$$\Phi_{Model} = (0,0017 + ((0,000008614) Dst_{Kyoto}) + ((1,0812 \times 10^{-8}) (Dst_{Kyoto})^2) + ((3,8937 \times 10^{-12}) (Dst_{Kyoto})^3)) (1 + 26000 \times (-0,28402)) \quad (3-2)$$

$$\Phi_{Model} = (0,0016 + ((0,000008295) Dst_{Kyoto}) + ((1,0411 \times 10^{-8}) (Dst_{Kyoto})^2) + ((3,7494 \times 10^{-12}) (Dst_{Kyoto})^3)) \times (1 + 27000 \times (-0,28402)) \quad (3-3)$$

$$\Phi_{Model} = (0,0016 + ((7,9987 \times 10^{-6}) Dst_{Kyoto}) + ((1,004 \times 10^{-8}) (Dst_{Kyoto})^2) + ((3,6155 \times 10^{-12}) (Dst_{Kyoto})^3)) \times (1 + 28000 \times (-0,28402)) \quad (3-4)$$

$$\Phi_{Model} = (0,0015 + ((7,7228 \times 10^{-6}) Dst_{Kyoto}) + ((9,6933 \times 10^{-9}) (Dst_{Kyoto})^2) + ((3,4908 \times 10^{-12})) \quad (3-5)$$

$$\Phi_{Model} = (0,0015 + ((7,4654 \times 10^{-6}) \text{Dst}_{Kyoto} + ((9,3702 \times 10^{-9}) \text{Dst}_{Kyoto}^2) + ((3,3744 \times 10^{-12}) \text{Dst}_{Kyoto}^3)) \times (1 + 30000 \times (-0,28402))) \quad (3-6)$$

$$\Phi_{Model} = (0,0014 + ((7,2245 \times 10^{-6}) \text{Dst}_{Kyoto} + ((9,0679 \times 10^{-9}) \text{Dst}_{Kyoto}^2) + ((3,2656 \times 10^{-12}) \text{Dst}_{Kyoto}^3)) \times (1 + 31000 \times (-0,28402))) \quad (3-7)$$

$$\Phi_{Model} = (0,0014 + ((6,9987 \times 10^{-6}) \text{Dst}_{Kyoto} + ((8,7845 \times 10^{-9}) \text{Dst}_{Kyoto}^2) + ((3,1635 \times 10^{-12}) \text{Dst}_{Kyoto}^3)) \times (1 + 32000 \times (-0,28402))) \quad (3-8)$$

$$\Phi_{Model} = (0,0013 + ((6,7866 \times 10^{-6}) \text{Dst}_{Kyoto} + ((8,5183 \times 10^{-9}) \text{Dst}_{Kyoto}^2) + ((3,0676 \times 10^{-12}) \text{Dst}_{Kyoto}^3)) \times (1 + 33000 \times (-0,28402))) \quad (3-9)$$

$$\Phi_{Model} = (0,0013 + ((6,587 \times 10^{-6}) \text{Dst}_{Kyoto} + ((8,2677 \times 10^{-9}) \text{Dst}_{Kyoto}^2) + ((2,9774 \times 10^{-12}) \text{Dst}_{Kyoto}^3)) \times (1 + 34000 \times (-0,28402))) \quad (3-10)$$

Sementara itu, dari nilai δ (deviasi/gangguan foF2) BPAA Sumedang melalui Persamaan (2-4) dan indeks Dst tahun 2010-2015 saat badai geomagnet kuat ($\text{Dst} < -100$ nT) maka dapat diperoleh korelasi nilai δ (deviasi/gangguan foF2) BPAA Sumedang minimum dan Dst minimum, $\Delta T_{onset} \delta$ (deviasi/gangguan foF2) BPAA Sumedang dan Dst minimum serta $\Delta T_{peak} \delta$ (deviasi/gangguan foF2) BPAA Sumedang minimum dan Dst minimum, seperti ditunjukkan pada Gambar 3-1.

Dari Gambar 3-1 tersebut diperoleh persamaan korelasi atau model statistik dan nilai korelasi dari ketiganya sebagai berikut,

$$peak \delta_{foF2} \text{ SMD} = 0,2835 (\text{Dst Min}) - 0,466 \quad (R = 74,76\%) \quad (3-11)$$

$$\Delta T_{onset} \delta_{foF2} \text{ SMD} = 0,0759 (\text{Dst min}) + 9,5816 \quad (R = 82,68\%) \quad (3-12)$$

$$\Delta T_{peak} \delta_{foF2} \text{ SMD} = 0,0403 (\text{Dst min}) + 19,303 \quad (R = 38,01\%) \quad (3-13)$$

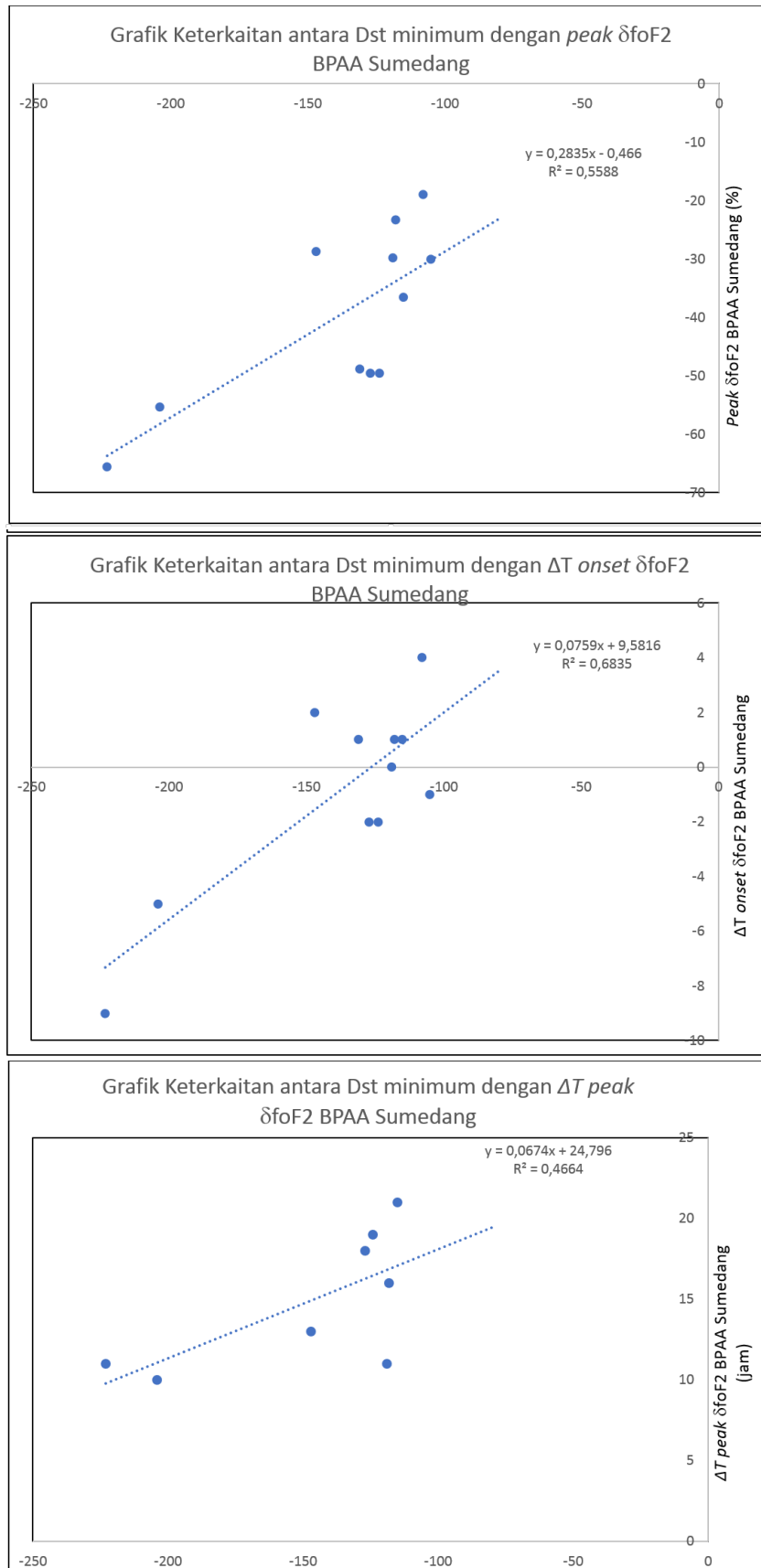
3.2 Uji Akurasi Φ_{Model} dan Model δ_{foF2} BPAA Sumedang

3.2.1 Uji Φ_{Model} : kasus badai geomagnet 20 Januari dan 13 Oktober 2013

Uji akurasi persamaan model Φ_{Model} BPAA Sumedang yang telah diperoleh di atas dilakukan menggunakan kejadian badai geomagnet tanggal 20 Januari (Φ_{Data} SMD = 6,35 MHz/ 12,475 MHz = 0,509; Dst = -93 nT) dan 13 Oktober 2016 (Φ_{Data} SMD = 4,3 MHz/ 11,2 MHz = 0,384; Dst = -105 nT). Input yang digunakan adalah Dst* (Dst(ap)) dan Dst_Kyoto pada kedua kejadian badai geomagnet tersebut. Hasilnya setelah difilter untuk nilai Φ model < 3 seperti ditunjukkan pada Gambar 3-2 dan 3-3.

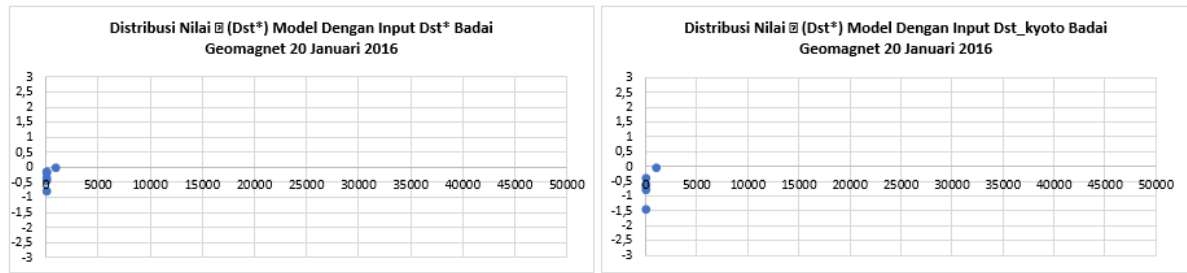
Gambar 3-2A menunjukkan nilai Φ_{Model} (Dst*) BPAA Sumedang hasil uji dengan input Dst* (kiri) dan dengan input Dst_Kyoto (kanan) saat kejadian badai geomagnet 20 Januari 2016. Sedangkan Gambar 3-2B menunjukkan nilai Φ_{Model} (Dst_Kyoto) BPAA Sumedang hasil uji dengan input Dst* (kiri) dan dengan input Dst_Kyoto.

Sementara itu, Gambar 3-3A menunjukkan nilai Φ_{Model} (Dst*) BPAA Sumedang hasil uji dengan input Dst* (kiri) dan dengan input Dst_Kyoto (kanan) saat kejadian badai geomagnet 13 Oktober 2016. Sedangkan Gambar 3-3B menunjukkan nilai Φ_{Model} (Dst_Kyoto) BPAA Sumedang hasil uji dengan input Dst* (kiri) dan dengan input Dst_Kyoto.

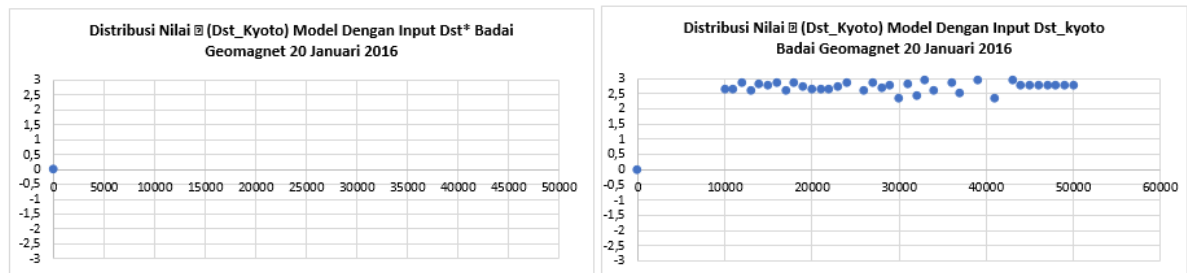


Gambar 3-1: Grafik korelasi antara Dst minimum dengan $peak \delta foF2_{SMD}$ (atas), Dst minimum dengan $\Delta t_{onset} \delta foF2_{SMD}$ (tengah) dan Dst minimum dengan $\Delta t_{peak} \delta foF2_{SMD}$ (bawah)

A

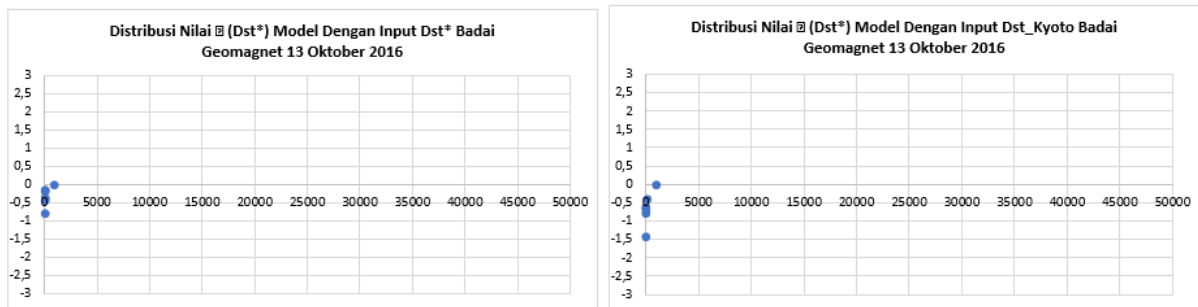


B

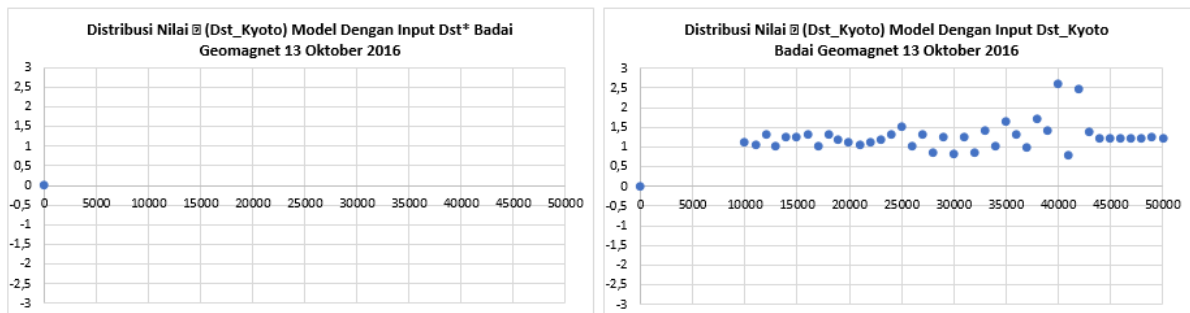


Gambar 3-2: Distribusi nilai Φ_{Model} BPAA Sumedang yang dibangun dengan input (A) Dst* dan (B) Dst_Kyoto untuk uji kejadian badai geomagnet 20 Januari 2016

A



B



Gambar 3-3: Distribusi nilai Φ_{Model} BPAA Sumedang yang dibangun dengan input (A) Dst* dan (B) Dst_Kyoto untuk uji kejadian badai geomagnet 13 Oktober 2016

Analisis visual terhadap Gambar 3-2 dan Gambar 3-3 terlihat nilai Φ (Dst_Kyoto) keluaran Φ_{Model} (Dst_Kyoto) baik untuk uji pada kejadian badai geomagnet tanggal 20 Januari 2016 maupun 13 Oktober 2016 mempunyai distribusi yang logis dan cukup mendekati nilai Φ_{Data} yakni $\Phi_{Data} = 0,509$ saat badai geomagnet tanggal 20 Januari

2016 dan $\Phi_{Data} = 0,384$ saat badai geomagnet tanggal 13 Oktober 2016.

3.2.2 Uji δ_{foF2} : kasus badai geomagnet 20 Januari dan 13 Oktober 2013

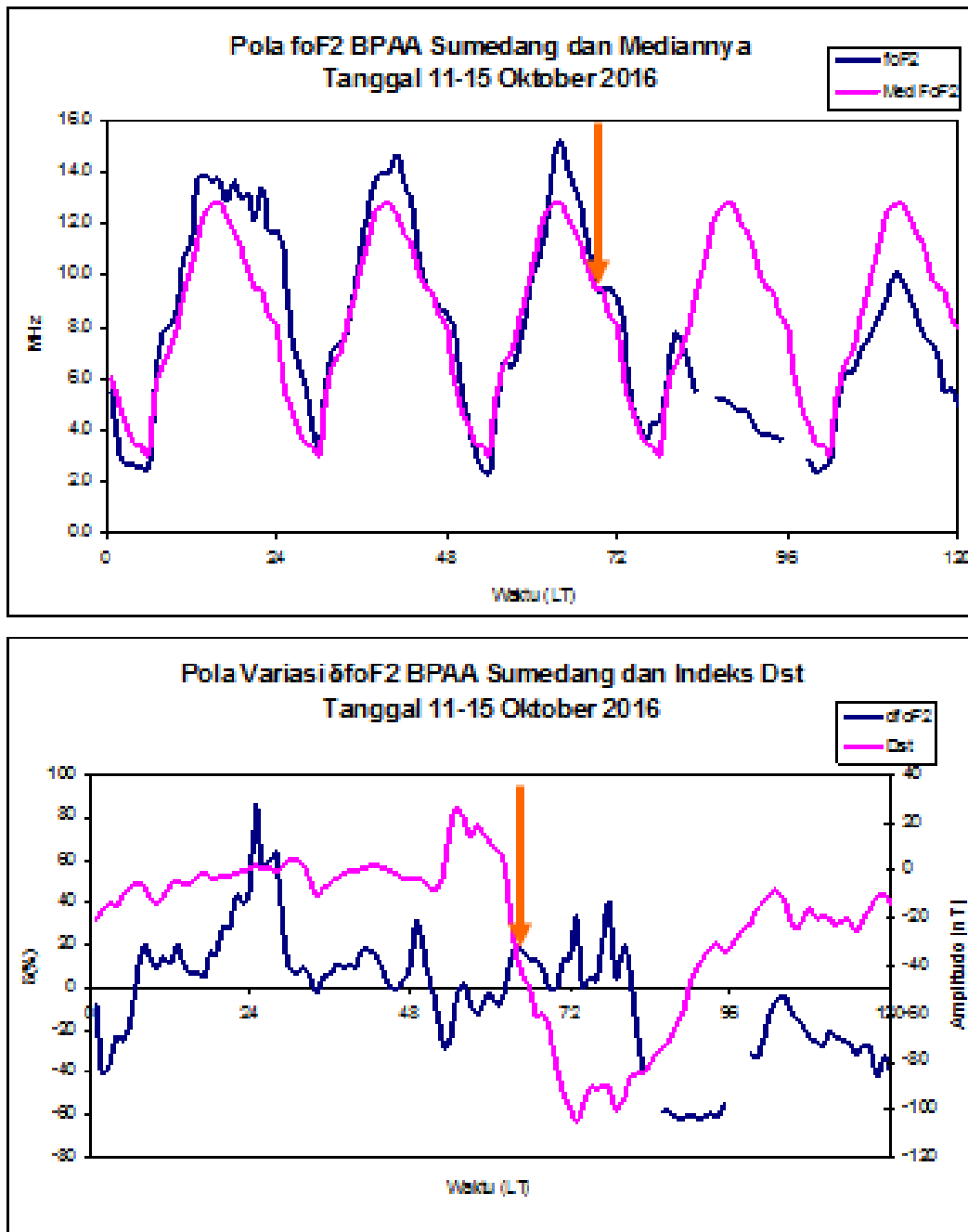
Persamaan (3-11) sampai (3-13) diuji pada kejadian badai geomagnet tanggal 20 Januari 2016 (Dst = -93 nT) dan 13 Oktober 2016 (Dst = -105 nT).

Hasilnya seperti ditunjukkan pada Gambar 3-4.

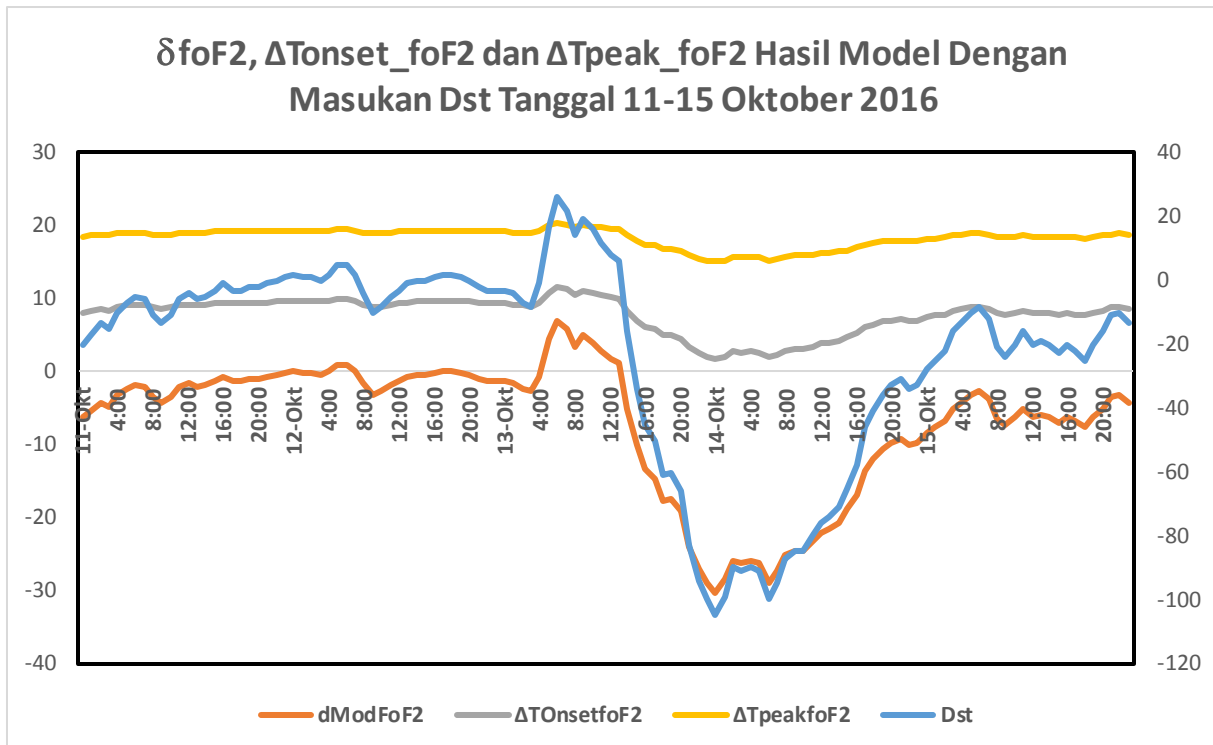
Dari Gambar 3-4 diperoleh nilai Φ_{Data} BPAA Sumedang = 0,387. Juga diperoleh nilai $\delta foF2$ BPAA Sumedang = -61,3%; $\Delta T_{onset} \delta foF2$ BPAA Sumedang = 7 dan $\Delta T_{peak} \delta foF2$ BPAA Sumedang adalah 18 jam. Kemudian Persamaan (3-11) sampai (3-13) diberi input Dst_{Kyoto} tanggal 19-24 Januari 2016 dan tanggal

11-15 Oktober 2016. Hasil keluarannya diplot bersama nilai Dst -nya. Contohnya seperti ditunjukkan pada Gambar 3-5.

Gambar 3-5 menunjukkan pola nilai $\delta foF2$; ΔT_{onset} dan $\Delta T_{peak} \delta foF2$ BPAA Sumedang keluaran model dengan input Dst minimum ($Dst_{min} = -105$ nT) pada badai geomagnet tanggal 13 Oktober 2016. Berdasarkan Gambar 3-4 dan Gambar 3-5 diperoleh Tabel 3-2.



Gambar 3-4: Pola variasi (atas) foF2 BPAA Sumedang dan Mediannya dan (bawah) $\delta foF2$; ΔT_{onset} dan $\Delta T_{peak} \delta foF2$ BPAA Sumedang Tanggal 11-15 Oktober 2016



Gambar 3-5: Nilai $\delta f_o F_2$; ΔT_{onset} dan ΔT_{peak} $\delta f_o F_2$ BPAA Sumedang keluaran model untuk Tanggal 11-15 Oktober 2016

Tabel 3-2: NILAI $\delta f_o F_2$; ΔT_{onset} DAN ΔT_{peak} $\delta f_o F_2$ BPAA SUMEDANG KELUARAN MODEL DAN DATA SERTA SELISIHNYA

No.	Tanggal Kejadian	Hmin	Thmin (UT)	MODEL			DATA		
				peak $\delta f_o F_2_{SMD}$	ΔT_{onset} $\delta f_o F_2_{SMD}$	ΔT_{peak} $\delta f_o F_2_{SMD}$	peak $\delta f_o F_2_{SMD}$	ΔT_{onset} $\delta f_o F_2_{SMD}$	ΔT_{peak} $\delta f_o F_2_{SMD}$
1.	20-01-2016	-93	17,00	-26,83%	2,5	15,5	-32%	2,15	15,4
2.	13-10-2016	-105	00,00	-30,23%	1,6	15,1	-61%	7	18

Δ (Mod-Data)		
5,17%	0,35 jam	0,1 jam
30,77%	-5,4 jam	-2,9 jam

Dari Tabel 3-2 terlihat bahwa selisih antara hasil keluaran model dengan data kurang dari 30% untuk δf_oF_2 BPAA Sumedang dan kurang dari 4 jam untuk $\Delta T_{\text{peak}} \delta f_oF_2$ BPAA Sumedang. Dengan demikian, dapat dikatakan bahwa model δf_oF_2 BPAA Sumedang numerik lokal memiliki sedikit keunggulan dibandingkan model empiris f_oF_2 ionosfer global Araujo-Pradere *et al.* (2002) modifikasi.

4 KESIMPULAN

Dari analisis disimpulkan bahwa model gangguan badai ionosfer f_oF_2 BPAA Sumedang ($\delta f_oF_{2\text{SMD}}$) akurasi lebih baik daripada model adopsi model Araujo-Pradere ($\Phi f_oF_{2\text{SMD}}$), walaupun keduanya memiliki selisih $< 40\%$ terhadap data. Dengan demikian, model badai ionosfer Sumedang dapat dipergunakan untuk mendukung kegiatan SWIFtS di Pusat Sains Antariksa-LAPAN sebagai bahan pertimbangan untuk kegiatan prediksi SWIFtS.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kami sampaikan kepada tim *scaling* data ionosfer Sumedang untuk ketersediaan data f_oF_2 ionosfer Sumedang dan juga kepada para penyunting yang dengan sabar telah memberikan masukan sehingga makalah ini dapat lebih sempurna.

DAFTAR RUJUKAN

Abdu, M.A., Sobral, J.H.A., Paula, E.R., Batista, I.S., 1991. *Magnetospheric Disturbance Effects on the Equatorial Ionization Anomaly (EIA): an Overview*. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 53, 757-771.

Araujo-Pradere, E. A., and T. J., Fuller-Rowell, 2000. *A Model of a Perturbed Ionosphere Using the Auroral Power as the Input*, Geofis. Int., 39(1), 29-36.

Araujo-Pradere E. A., Fuller-Rowell T. J., and Codrescu M. V., 2002. *STORM: An Empirical Storm-Time Ionospheric Correction Model*,

RADIO SCIENCE, VOL. 37, NO. 0, 10.1029/2001RS002467.

- Bilitza, D., 1990. *International Reference Ionosphere 1990*, http://www.ngdc.noaa.gov/wdc/webbook/wdca/wdca_rocks.html, Natl. Space Sci. Data Cent., World Data Cent. A for Rockets and Satellites, Greenbelt, Md.
- Bilitza, D., 2001. *International Reference Ionosphere 2000*, Radio Sci., 36(2), 261-276.
- Fuller-Rowell, T. J., D., Rees, S., Quegan, R. J., Moffett, M. V., Codrescu, and G. H., Millward, 1996. *A Coupled Thermosphere-Ionosphere Model (CTIM)*, in *STEP: Handbook of Ionospheric Models*, edited by R. W. Schunk, pp. 239-279, Sci. Comm. on Sol.-Terr. Phys., Boulder, Colorado-USA.
- Fuller-Rowell, T. J., M. V., Codrescu, E. A., Araujo-Pradere, and I., Kutiev, 1998. *Progress in Developing a Storm-Time Ionospheric Correction Model*, Adv. Space Res., 22(6), 821-827.
- Gopalswamy, N., 2009. *Halo Coronal Mass Ejections and Geomagnetic Storm*, Earth Planet Space, 61, 1-3.
- Lusiani, E. S., Mumpuni, J. A., Utama, 2011. *Analisis Kaitan Badai Geomagnet dengan Badai Ionosfer Sebagai Dampak Kejadian Lontaran Massa Korona Matahari (Oktober-November 2003)*, Prosiding Seminar Nasional Astronomi Indonesia.
- Mukherjee, S., Sarkar S., Purohit P. K., Gwal A. K., 2010. *Effect of Geomagnetic Storms in the Equatorial Anomaly Region Observed from Ground Based Data*, Int. Journal of Geomagnetism and Geosciences, Vol. 1, No. 3, 478-488.
- Rastogi, R.G., 1999. *Geomagnetic Storm Effects at Low Latitudes*, Ann. Geophys., 17, 438-444.
- Rawer, K., D., Bilitza, and S., Ramakrishnan, 1978. *Goals and Status of the International Reference Ionosphere*, Rev. Geophys., 16, 177-181.
- Rodger, A. S., G. L., Wrenn, and H., Rishbeth, 1989. *Geomagnetic Storms in the Antarctic F Region*, II, physical interpretation, J. Atmos. Terr. Phys., 51, 851-866.

Russell, C.T., 2006. *The Solar Wind Interaction with the Earth's Magnetosphere : Tutorial*, Department of Earth and space sciences and Institute of Geophysics and Space Physics of University of California, Los Angeles.

Yatini, C. Y., Jiyo, M., Ruhimat, 2009. *Badai Matahari dan Pengaruhnya pada Ionosfer dan Geomagnet di Indonesia*, Majalah

Sains dan Teknologi Dirgantara Vo. 4 No. 17-24.

Zhao, B., Wan W., Liu L., K., Igarashi, K., Yumoto, Baiqi Ning, 2009. *Ionospheric Response to the Geomagnetic Storm on 13-17 April 2006 in the West Pacific Region*, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 71 (2009) 88–100.

**ANALISIS KONDISI FLUKS ELEKTRON DI SABUK RADIASI
ELEKTRON LUAR BERDASARKAN MEDAN MAGNET ANTARPLANET
(BZ) DAN KECEPATAN ANGIN MATAHARI
(ANALYSIS OF ELECTRON FLUX CONDITION IN OUTER ELECTRON
RADIATION BELT BASED ON INTERPLANETARY MAGNETIC FIELD
(BZ) AND SOLAR WIND SPEED)**

Siska Filawati

Pusat Sains Antariksa

Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional

Jl. Dr. Djunjunan 133 Bandung 40173 Indonesia

e-mail: siska.filawati@lapan.go.id

Diterima 11 Agustus 2017; Direvisi 10 Januari 2018; Disetujui 10 Januari 2018

ABSTRACT

Interplanetary space is a hazard precursor for solar eruption toward earth. The solar eruptions enhance electron flux that can lead to anomalies, shifts, and permanent damage to spacecraft, e.g. satellites. The data used in this paper are interplanetary space data represented by interplanetary magnetic field (Bz) and solar wind speed, as well as Dst and AE indexes as comparison indicating disturbance has reached Earth's poles and equator during 2011-2012. The method used is to determine the value of maximum and minimum Bz in the year 2011-2012 which is taken five days before and after. Analysis and calculation of correlation is done to data of Bz-electron flux and solar wind velocity-electron flux. Clarification of disturbance in interplanetary space and outer electron radiation belt is using index data Dst and AE indexes are used to clarify interplanetary space and outer electron radiation belt disturbances. The aim of this study is to determine the characteristics of interplanetary space that can increase the electron flux so that the space weather early warning can be done. It was found that the period of electron flux enhancement after decrease and increase of Bz was 2 to 3 days. The electron flux would enhance when interplanetary space was in its normal condition at solar wind speed 500 km/sec and Bz is -5 nT to +5 nT. Electron flux correlation with solar wind velocity was better than with Bz.

Keywords: *interplanetary space, electron flux, interplanetary magnetic field (Bz), solar wind speed, Dst index, AE index*

ABSTRAK

Kondisi ruang antarplanet merupakan prekursor bahaya erupsi matahari terhadap bumi. Erupsi matahari dapat menyebabkan peningkatan fluks elektron. Tingginya fluks elektron dapat menyebabkan anomali, pergeseran, dan kerusakan permanen pada wahana antariksa, misal satelit. Data yang digunakan pada makalah ini adalah data ruang antarplanet yang diwakili oleh kondisi medan magnet antarplanet (B_z) dan kecepatan angin matahari yang merupakan prekursor peningkatan fluks elektron serta data indeks Dst dan indeks AE sebagai pembanding bahwa gangguan telah mencapai kutub dan ekuator bumi selama rentang waktu 2011-2012. Metode yang digunakan adalah menentukan nilai B_z maksimum dan minimum dalam tahun 2011-2012 yang selanjutnya dari penanggalan data tersebut diambil data lima hari sebelum dan sesudah. Analisis dan perhitungan korelasi dilakukan terhadap data B_z -fluks elektron dan kecepatan angin matahari-fluks elektron. Klarifikasi gangguan yang terjadi di ruang antarplanet dan sabuk radiasi elektron luar menggunakan data indeks Dst dan indeks AE. Tujuan ditulisnya makalah ini adalah untuk mengetahui karakteristik kondisi ruang antarplanet yang dapat meningkatkan fluks elektron agar peringatan dini cuaca antariksa dapat dilakukan. Hasil yang didapatkan adalah waktu yang dibutuhkan fluks elektron setelah terjadi penurunan dan peningkatan B_z adalah 2 hingga 3 hari, fluks elektron akan meningkat saat kondisi ruang antarplanet normal yaitu pada kecepatan 500 km/detik dan B_z -5 nT hingga +5 nT, korelasi fluks elektron dengan kecepatan angin matahari lebih baik dibanding fluks elektron dengan B_z .

Kata kunci: Ruang antarplanet, fluks elektron, medan magnet antar-planet (B_z), fluks elektron, kecepatan angin matahari, indeks Dst, indeks AE

1 PENDAHULUAN

Mengetahui kondisi peningkatan fluks elektron di sabuk radiasi elektron bagian luar merupakan suatu keharusan dalam penelitian cuaca antariksa karena elektron dapat menyebabkan anomali pada *spacecraft* (satelit, stasiun antariksa) yang menyajikan data observasi cuaca, komunikasi, dan layanan penting lainnya (Baker *et al.*, 1987; Kataoka dan Miyoshi, 2006; Miyoshi dan Kataoka, 2008). Peningkatan fluks elektron di sabuk radiasi elektron bagian luar disebabkan oleh aktivitas matahari seperti *Coronal Mass Ejection* (CME), *Corotating Interaction Region* (CIR) (Kataoka dan Miyoshi, 2006; Filawati dan Nuraeni, 2017), dan *High Intensity, Long Duration, Continuous AE Activity* (HILDCAA) (Hajra *et al.*, 2014).

Sabuk radiasi elektron luar merupakan wilayah populasi elektron dengan energi di atas 0,1 MeV (NOAA) yang berpusat pada jarak 4 dan 5 R_E (Li dan Temerin, 2001). R_E merupakan jari-jari Bumi yang bernilai 6371 km. CME

atau lontaran massa korona merupakan erupsi matahari yang paling berdampak terhadap Bumi dibanding dengan yang lain, namun pengaruhnya terhadap fluks elektron di sabuk radiasi elektron bagian luar tidak terlalu besar karena CME akan meningkatkan fluks elektron di sabuk radiasi elektron bagian dalam (Kataoka dan Miyoshi, 2006). CIR merupakan peristiwa yang terjadi di ruang antarplanet yang diakibatkan oleh angin matahari berkecepatan tinggi berinteraksi dengan angin matahari berkecepatan rendah (Heber *et al.*, 1999). HILDCAA merupakan peristiwa yang terjadi di wilayah polar (kutub magnet bumi) yang diidentifikasi oleh indeks AE lebih besar dari 1000 nT yang terjadi selama minimal dua hari (Hajra *et al.*, 2014; Hajra *et al.*, 2013).

CME dan CIR bergantung pada siklus matahari. CME akan sering terjadi saat siklus matahari naik hingga menuju turun, CIR dan HILDCAA sering terjadi saat siklus matahari minimum, sehingga

fluks elektron juga memiliki karakteristik tertentu (Kataoka dan Miyoshi, 2006; Filawati dan Nuraeni, 2017; Hajra *et al.*, 2014).

Sebelum partikel berenergi dari matahari mencapai sabuk radiasi elektron bagian luar, partikel tersebut akan terlebih dahulu melewati ruang antarplanet (*Interplanetary Space/IS*). Parameter IS yang dijadikan pedoman adalah kecepatan angin matahari, kerapatan plasma, medan magnet antarplanet arah Utara-Selatan (Bz), dan temperatur angin matahari (Miyoshi dan Kataoka, 2008; Li dan Temerin, 2001). Diketahui bahwa sabuk radiasi elektron bagian luar berkorelasi dengan kecepatan angin matahari (Paulikas dan Blake, 1979; O'Brien *et al.*, 2001; Kataoka dan Miyoshi, 2006; Weigel *et al.*, 2003). Beberapa kasus menunjukkan bahwa Bz negatif dapat meningkatkan kecepatan angin matahari (Iles *et al.*, 2002; Miyoshi *et al.*, 2007; Miyoshi dan Kataoka, 2008; Blake *et al.*, 1997).

Erupsi matahari yang telah mencapai Bumi dapat dilihat dari kondisi indeks *Auroral Electrojet* (AE) yang merupakan indeks gangguan di wilayah polar/kutub Bumi dan indeks *Disturbance Storm Time* (Dst) merupakan indeks gangguan di wilayah ekuator dan lintang rendah Bumi. Untuk sumber erupsi matahari yang berbeda, dampak yang teramati di indeks AE dan indeks Dst juga berbeda.

Pada makalah ini akan dipaparkan kondisi fluks elektron saat Bz mengalami penurunan maupun peningkatan dan akan dianalisis kondisinya berdasarkan kondisi Bz dan kecepatan angin matahari. Perubahan kondisi di IS tentunya akan mempengaruhi kondisi magnetosfer bumi terutama sabuk radiasi elektron bagian luar.

Masalah yang ditimbulkan dari besarnya fluks elektron adalah terkait dengan *deep dielectric charging* pada satelit yang dapat menyebabkan anomali hingga kerusakan pada satelit (Kataoka dan Miyoshi, 2006). *Deep dielectric charging*

terjadi ketika elektron energi tinggi menembus komponen satelit dan menghasilkan penumpukan muatan di dalam material. Hal ini dapat menyebabkan anomali pada satelit dan dapat mengakibatkan disfungsi sementara atau permanen. Tercatat bahwa beberapa satelit pernah mengalami kerusakan fatal seperti Galaxy VII, Solidaridad 1, dan ASCA (Astro-D) pada tahun 2000 (Allen, 2002). Oleh karena dampaknya sangat signifikan terhadap benda antariksa, kondisi fluks elektron merupakan salah satu parameter yang diperhitungkan dalam mengetahui kondisi cuaca antariksa.

Dalam hal antisipasi bahaya besar fluks elektron terhadap satelit, hal ini perlu pengkajian lebih dalam lagi terkait kondisi satelit dan dalam makalah ilmiah ini tidak dibahas terkait hal tersebut. Namun, dalam praktiknya analisis dampak negatif kondisi fluks elektron terhadap satelit dapat dijadikan sebagai pertimbangan perlakuan terhadap satelit saat fluks elektron tinggi, yang selama ini dilakukan adalah mematikan sistem elektroniknya saat terdapat peningkatan fluks elektron di atas 10^4 partikel $\text{sr}^{-1}\text{s}^{-1}\text{cm}^{-2}$ dan sebagai bahan pertimbangan material dan sistem kerja satelit agar bisa bertahan pada kondisi cuaca antariksa yang ekstrem (Allen, 2002).

Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah untuk mengetahui karakteristik kondisi ruang antarplanet yang dapat meningkatkan fluks elektron agar peringatan dini cuaca antariksa dapat dilakukan.

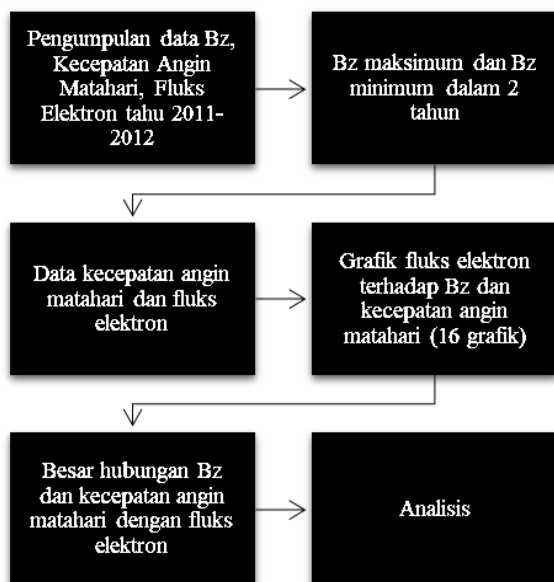
2 METODOLOGI

Data yang digunakan adalah data kecepatan angin matahari, Bz koordinat GSM, fluks elektron, indeks AE, dan indeks Dst tahun 2011 hingga 2012. Data kecepatan angin matahari dan Bz diperoleh dari arsip *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) <ftp://sohoftp.nascom.nasa.gov/sdb/goes/ace/monthly/>. Data yang digunakan adalah data per jam. Data kecepatan angin

matahari yang digunakan adalah dalam satuan km/detik dan data Bz dalam satuan nT. Kedua variabel tersebut merupakan salah satu parameter untuk mengetahui kondisi ruang antarplanet.

Data fluks elektron dari NOAA https://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/new_avg/. Data tersebut merupakan data satelit GOES13 dengan energi ≥ 2 MeV. Berdasarkan klasifikasi NOAA, fluks elektron dengan energi ≥ 2 MeV dikategorikan sebagai fluks elektron energi tinggi yang dapat menyebabkan gangguan pada satelit yang mengorbit di wilayah tersebut. Fluks elektron berenergi tinggi dikaitkan sebagai penyebab *deep dielectric charging* (NOAA, 2017). Data awal fluks elektron merupakan data rata-rata setiap 5 menit yang kemudian diolah menjadi data rata-rata setiap jam dalam satuan partikel $\text{sr}^{-1}\text{s}^{-1}\text{cm}^{-2}$.

Data indeks AE dan indeks Dst dari *World Data Center* (WDC) Kyoto <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstae/index.html>. Gangguan di IS yang telah sampai di Bumi dikonfirmasi menggunakan data indeks AE dan indeks Dst.



Gambar 2-1: Diagram Alir Penelitian

Gambar 2-1 menunjukkan proses pengolahan data hingga analisis. Proses awal pengolahan data adalah identifikasi dilakukan terhadap nilai Bz. Dalam tahun 2011 hingga 2012 dicari nilai Bz

maksimum dan Bz minimum. Diambil empat data Bz maksimum dan Bz minimum yang teridentifikasi. Waktu pada delapan data Bz maksimum dan minimum tersebut akan digunakan sebagai waktu pada data kecepatan angin matahari, fluks elektron, indeks AE, dan indeks Dst. Klasifikasi ini bertujuan untuk mengetahui bagaimana pengaruh kondisi ruang antarplanet terhadap fluks elektron serta pengaruhnya di wilayah kutub (*auroral zone*) berdasarkan indeks AE dan indeks Dst untuk wilayah ekuator dan lintang rendah. Dari identifikasi Bz maksimum dan minimum akan dilakukan uji korelasi untuk mengetahui hubungan fluks elektron dengan kondisi IMF Bz dan kecepatan angin matahari secara kuantitatif.

3 PEMBAHASAN

Hasil penelitian ini berupa hasil kualitatif dan kuantitatif. Hasil kualitatif berupa grafik yang menunjukkan pola fluks elektron terhadap kondisi Bz dan kecepatan angin matahari. Hasil kuantitatif berupa nilai signifikansi dan koefisien korelasi fluks elektron dilihat dari kondisi ruang antarplanet, Bz dan kecepatan angin matahari.

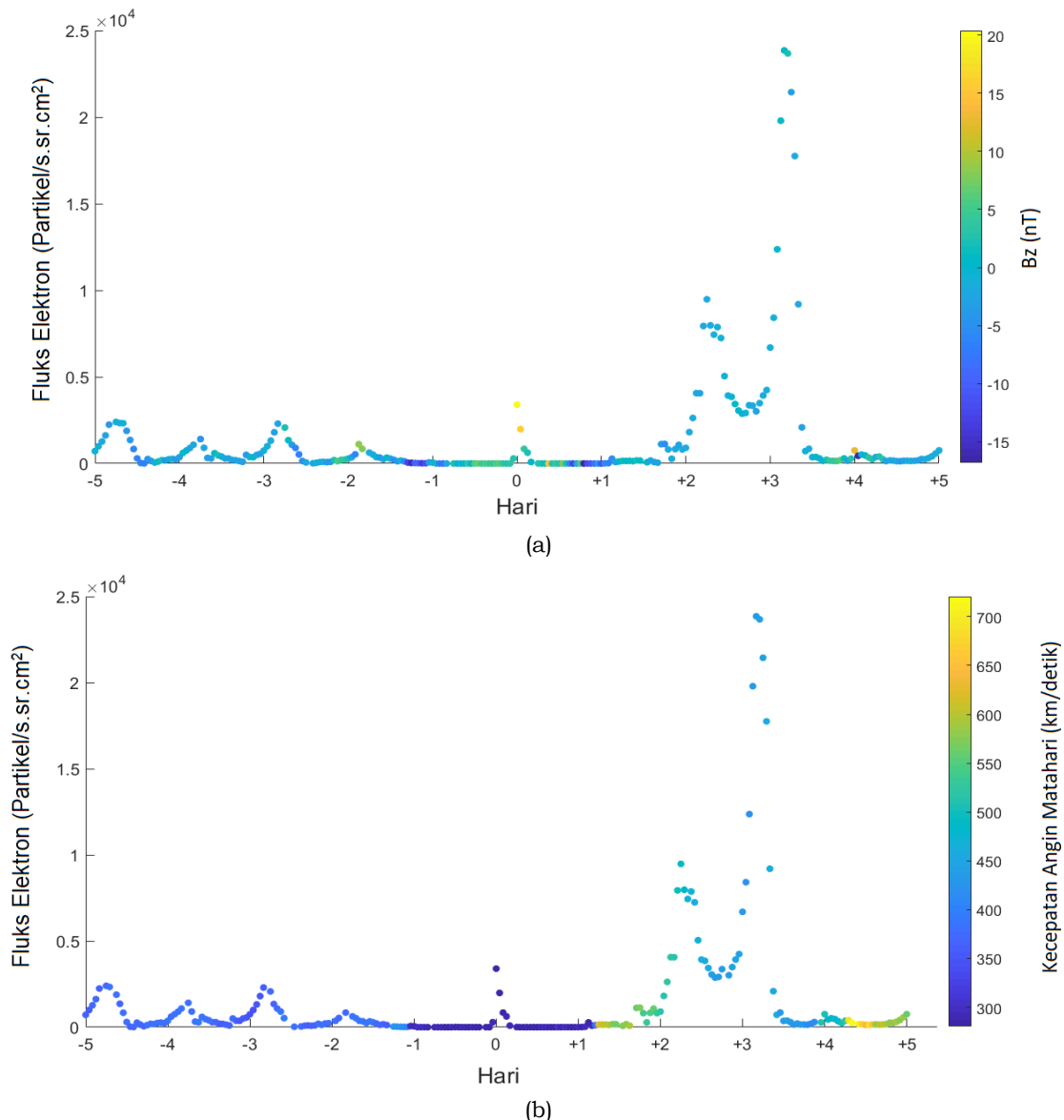
Klasifikasi Bz maksimum terjadi pada tanggal 5 Agustus 2011, 26 September 2011, 15 Juli 2012, dan 14 November 2012. Bz minimum terjadi pada tanggal 18 Februari 2011, 22 Januari 2012, 8 Maret 2012, dan 16 Juni 2012.

Berdasarkan penelitian sebelumnya, terdapat tiga pemicu peningkatan fluks elektron yaitu CME, CIR (Kataoka dan Miyoshi, 2006) dan HILDCAA (*High Intensity, Long Duration, Continuous AE Activity*) (Hajra et al., 2014). Hasil pengolahan data Bz maksimum dan Bz minimum tahun 2011-2012 menunjukkan perilaku fluks elektron yang berbeda. Hal ini disebabkan oleh sumber gangguan yang berbeda. Selain itu, ketiga pemicu tersebut akan efektif meningkatkan fluks elektron jika terjadi pada musim semi

dan gugur (STFA/*Spring Toward Fall Away*) yaitu di bulan musim semi Februari, Maret, April, Mei dan bulan musim gugur Agustus, September, Oktober, dan November (Miyoshi dan Kataoka, 2008).

Pola fluks elektron terhadap B_z dan kecepatan angin matahari menunjukkan bahwa saat gangguan di ruang antarplanet yang ditandai dengan kondisi B_z lebih dari +10 nT atau kurang dari -10 nT serta kecepatan angin matahari lebih dari 500 km/detik, fluks

elektron mengalami penurunan. Fluks elektron akan meningkat saat kondisi B_z dan kecepatan angin matahari pada kondisi normal, yaitu -5 nT hingga +5 nT dan 300 km/detik hingga 400 km/detik. Kenaikan fluks elektron terjadi pada 2-3 hari setelah B_z mengalami kondisi maksimum atau minimum dengan besar fluks yang bergantung dari sumber gangguan.



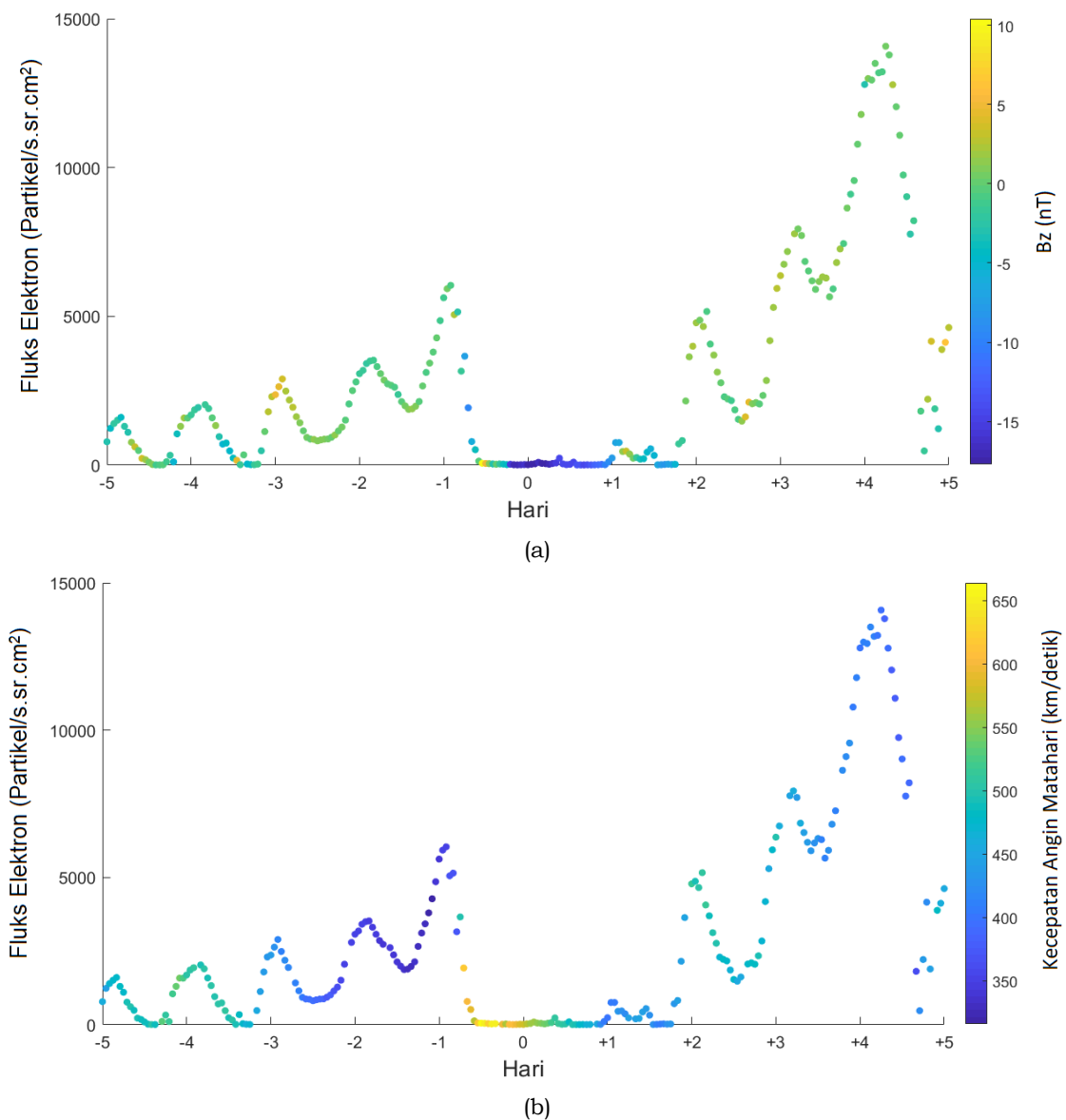
Gambar 3-1: Kondisi Fluks Elektron 8 Maret 2012 dengan kondisi (a) B_z (b) Kecepatan angin matahari

Kenaikan fluks elektron bervariasi bergantung pada sumber gangguan di Matahari. Pada tanggal 8 Maret 2012 dan 15 Juli 2012 yang ditunjukkan Gambar

3-1 dan Gambar 3-2, fluks elektron lebih dari 10^4 partikel $\text{sr}^{-1}\text{s}^{-1}\text{cm}^{-2}$. Sedangkan yang lain kurang dari 10^4 partikel $\text{sr}^{-1}\text{s}^{-1}\text{cm}^{-2}$. Hal ini disebabkan oleh CME yang terjadi

tidak terlalu besar, kecepatan CME yang rendah, dan tidak geoeftif. Kegeoeftifan CME dilihat dari arah erupsinya yang mengarah ke barat menuju Bumi (Kim *et al.*, 2008). Sedangkan CME yang terjadi sebelum tanggal 8 Maret 2012 dan 15 Juli 2012 adalah CME yang tidak geoeftif, namun CME berulang kali terjadi bahkan dalam satu hari terjadi beberapa CME. Oleh karena itu, peristiwa ini di wilayah ruang antarplanet menyebabkan CIR, yaitu adanya dorongan kecepatan angin matahari yang berinteraksi dengan

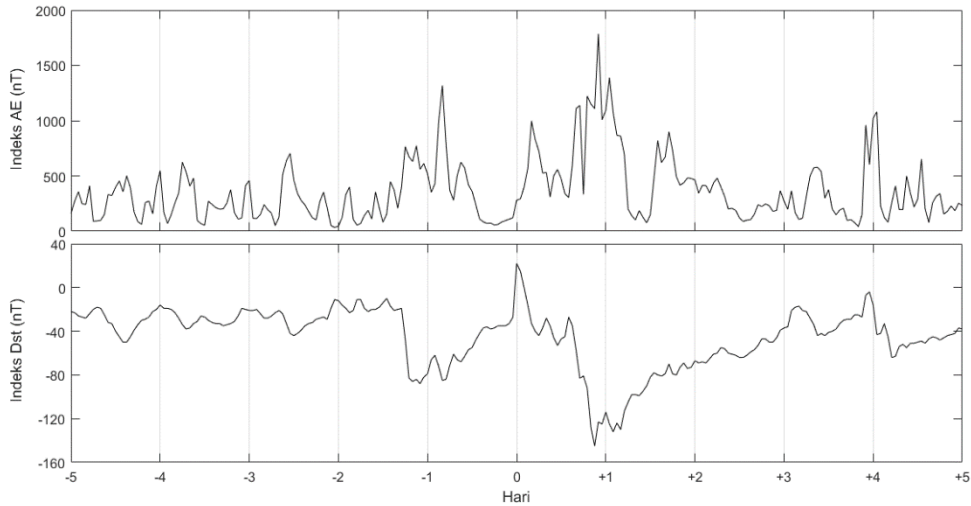
kecepatan plasma yang lebih rendah di ruang antarplanet. Hasilnya magnetosfer akan dihantam oleh partikel dari ruang antarplanet bertubi-tubi, terus menerus sehingga partikel yang mengarah ke kutub magnet utara semakin banyak. Akibatnya indeks AE yang terpantau akan menunjukkan nilai yang besar lebih dari 1000 nT selama beberapa hari berturut-turut dan menyebabkan terjadinya HILDCAA. Peristiwa HILDCAA tanggal 8 Maret 2012 dapat dilihat dari nilai indeks AE Gambar 3-3.



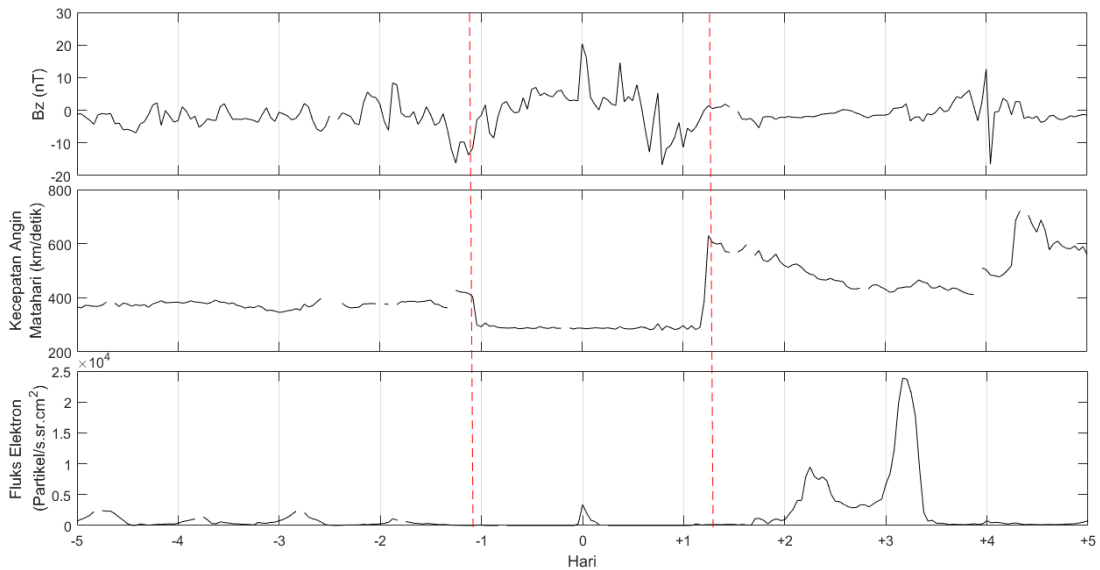
Gambar 3-2:Kondisi Fluks Elektron 15 Juli 2012 dengan kondisi (a) Bz (b) Kecepatan angin matahari

Peristiwa 8 Maret 2012 menjadi perhatian tersendiri karena sebelum badai geomagnet akibat CME datang, indeks AE dan indeks Dst sudah terganggu dan Bz menunjukkan nilai positif hingga +20,4 nT, yang artinya arah medan magnet antarplanet yang menuju Bumi bergerak/bergeser ke utara sehingga akan terjadi penguatan

medan magnet bumi, hal ini dapat dilihat dengan nilai indeks Dst meningkat hingga +22 nT karena adanya penguatan. Gambar 3-4 menunjukkan bahwa terjadi anomali pada Bz dan kecepatan angin matahari seperti terlihat pada garis putus-putus warna merah.



Gambar 3-3: Kondisi Indeks AE dan Indeks Dst Tanggal 8 Maret 2012

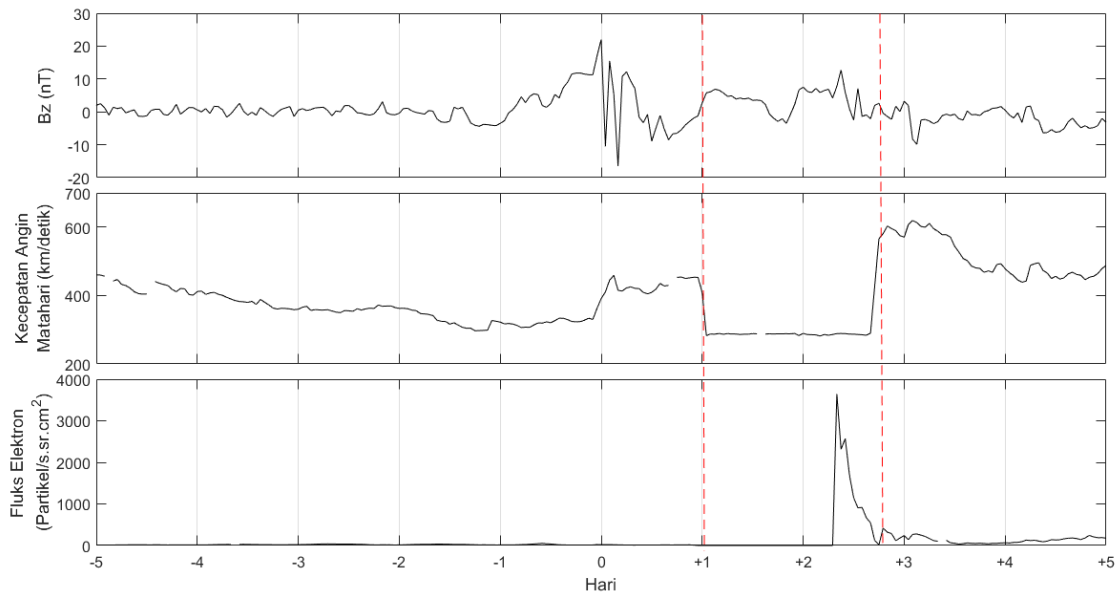


Gambar 3-4: Kondisi Bz, Kecepatan Angin Matahari, dan Fluks Elektron Tanggal 8 Maret 2012

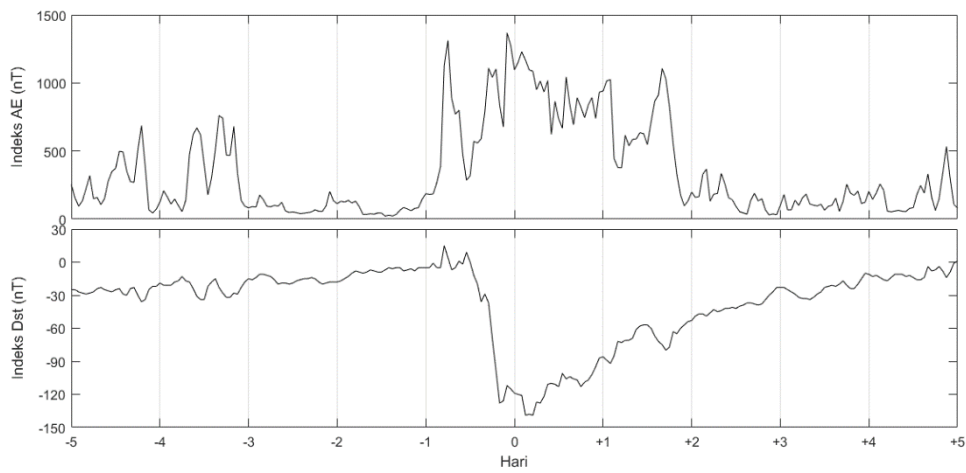
Seharusnya saat terjadi kenaikan atau penurunan Bz kecepatan angin matahari naik. Saat Bz naik maksimum sebesar +20,4 nT, indeks Dst tanggal 8 Maret 2012 pada Gambar 3-3 memperlihatkan penguatan yaitu sebesar +20 nT dengan kecepatan di

sekitar 300 km/detik. Setelah dilakukan konfirmasi melalui *File Transfer Protocol* (FTP), diketahui bahwa data kecepatan angin matahari pada 8 Maret 2012 perekamannya tidak bagus. Hal serupa juga terjadi pada kondisi kecepatan

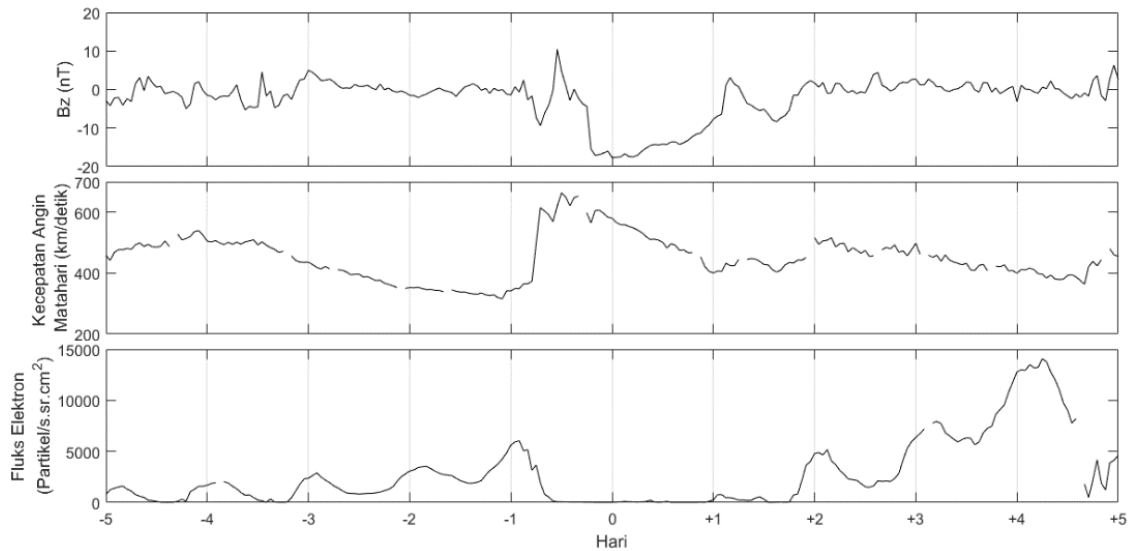
angin matahari tanggal 22 Januari 2012 yang ditunjukkan Gambar 3-5.



Gambar 3-5: Kondisi B_z , Kecepatan Angin Matahari, dan Fluks Elektron Tanggal 22 Januari 2012



Gambar 3-6: Kondisi Indeks AE dan Indeks Dst Tanggal 15 Juli 2012



Gambar 3-7: Kondisi B_z , Kecepatan Angin Matahari, dan Fluks Elektron Tanggal 15 Juli 2012

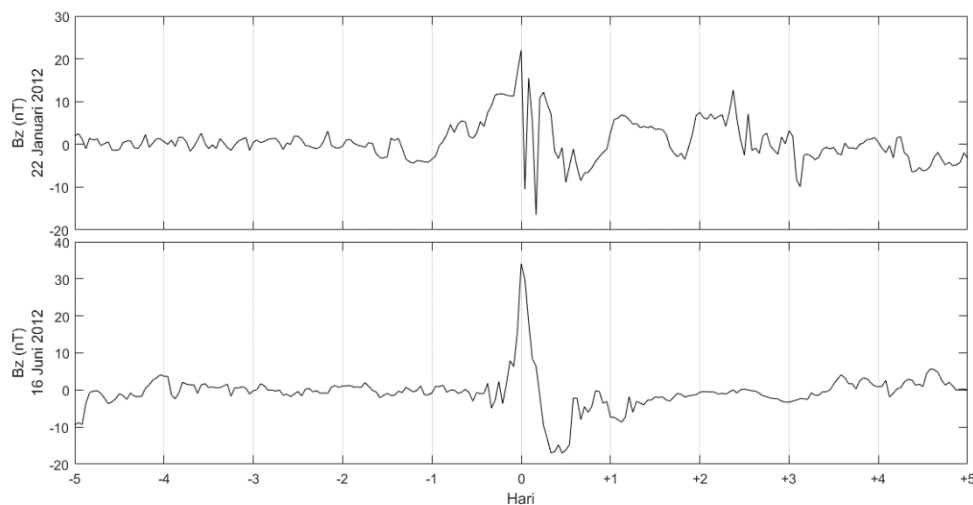
Kondisi Bz pada 15 Juli 2012 pada Gambar 3-7, menunjukkan nilai negatif di -17,7 nT dan kecepatan angin matahari mendekati nilai 700 km/detik serta menghasilkan kenaikan fluks elektron sebesar $1,4 \times 10^4$ partikel $\text{sr}^{-1}\text{s}^{-1}\text{cm}^{-2}$. Berdasarkan penelitian Miyoshi dan Kataoka (2007), parameter yang paling efektif untuk meningkatkan nilai fluks elektron adalah kecepatan angin matahari yang tinggi dan Bz negatif di bulan musim semi dan musim gugur. Hasil dari makalah ini juga menunjukkan hasil yang sama, nilai Bz maksimum dan minimum dalam dua tahun terdapat pada kejadian yang dipaparkan dalam makalah ini.

Tabel 3-1: HASIL KORELASI

No	Tanggal	Bz & Fluks Elektron (a)		Kecepatan Angin Matahari & Fluks Elektron (b)	
		Signifi kansi	Koef korelasi	Signifi kansi	Koef korelasi
1	18-Feb-11	0,877	0,014	0	-0,688
2	22-Jan-12	0	-0,364	0	0,548
3	08-Mar-12	0,78	0,026	0,058	-0,173
4	16-Jun-12	0	0,66	0	-0,572
5	05-Agu-11	0,245	0,106	0,004	0,26
6	26-Sep-11	0	0,416	0	-0,33
7	15-Jul-12	0	0,602	0	-0,404
8	14-Nov-12	0,777	-0,026	0	-0,316

Hasil korelasi (a) menunjukkan besar hubungan fluks elektron dengan Bz dan (b) merupakan besar hubungan fluks elektron dengan kecepatan angin matahari. Tabel 3-1 nomor 1 hingga 4 merupakan kejadian saat Bz maksimum dan nomor 5 hingga 8 saat Bz minimum. Tabel 3-1 menunjukkan bahwa terdapat korelasi untuk beberapa data fluks elektron dengan Bz dan kecepatan angin matahari. Hasil korelasi antara fluks elektron dan kecepatan angin matahari lebih baik dibanding dengan fluks elektron dengan Bz yang ditunjukkan oleh nilai signifikansi lebih dari 0,05 pada perhitungan kolom (b).

Hasil korelasi Bz maksimum dengan nilai signifikansi kurang dari 0,05 terjadi pada tanggal 22 Januari 2012 dan 16 Juni 2012. Sumber gangguan pada tanggal tersebut disebabkan oleh beberapa CME yang terjadi selama empat hingga lima hari sebelumnya dengan luas erupsi CME mencapai 360° . Tanggal 22 Januari 2012 hubungan antara Bz dan fluks elektron adalah berbanding terbalik, hal ini dikarenakan kondisi Bz yang terjadi pada 22 Januari 2012 fluktuatif, sedangkan pada 16 Juni 2012 hanya mengalami peningkatan hingga +34,1 nT kemudian kembali normal seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3-8.



Gambar 3-8: Kondisi Bz 22 Januari 2012 dan 16 Juni 2012

Saat Bz maksimum, hubungan kecepatan angin matahari dan fluks

elektron berbanding terbalik, yang artinya saat kondisi kecepatan angin

matahari menurun, fluks elektron naik. Hasil signifikansi lebih dari 0,05 ditemukan pada tanggal 8 Maret 2012. Berdasarkan analisis sebelumnya, pada tanggal tersebut kualitas data kecepatan angin matahari tidak bagus. Kejadian serupa juga terjadi pada tanggal 22 Januari 2012.

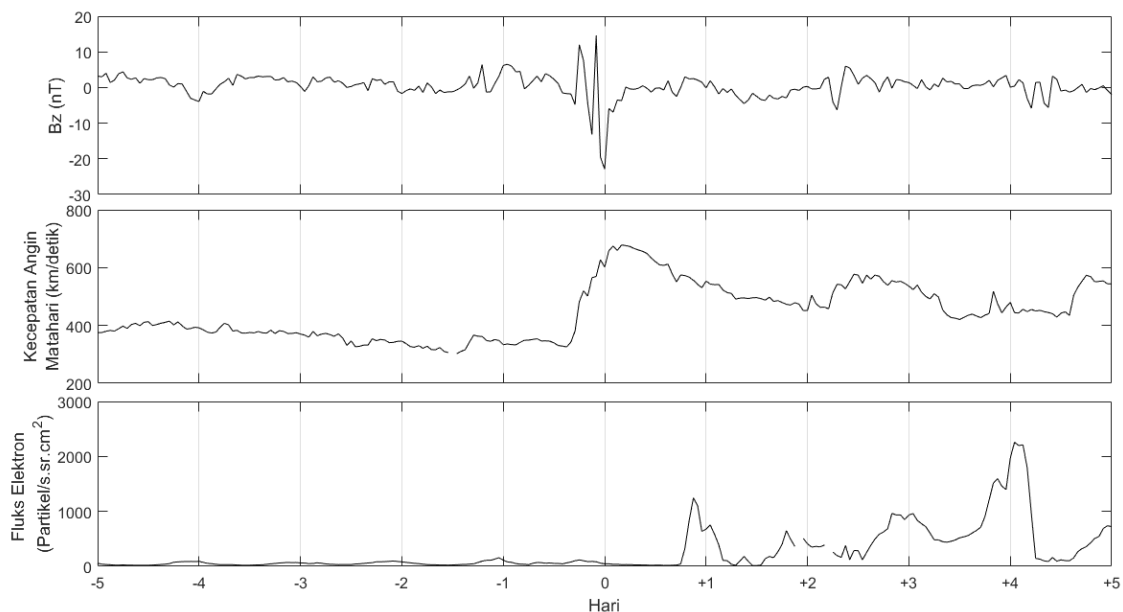
Hasil koefisien korelasi Tabel 3-1 nomor 5 hingga 8 merupakan identifikasi saat Bz minimum. Nilai signifikansi kurang dari 0,05 terjadi pada tanggal 26 September 2011 yang disebabkan oleh CME dan 15 Juli 2012 disebabkan oleh HILDCAA, sedangkan pada perhitungan (b), semua perhitungan signifikansi menunjukkan nilai kurang dari 0,05.

Pada 26 September 2011 nilai Bz minimum di -22,9 nT dengan koefisien korelasi 0,416 (a) dan -0,33 (b), seperti yang ditunjukkan Gambar 3-9, kecepatan angin matahari kurang dari 700 km/detik dan sumber gangguannya adalah CME geoeftif dan luasan erupsinya besar hingga mencapai 360°. Fluks elektron bernilai kurang dari 2500 partikel $\text{sr}^{-1}\text{s}^{-1}\text{cm}^{-2}$. Rendahnya nilai fluks elektron karena CME akan meningkatkan fluks elektron tidak di

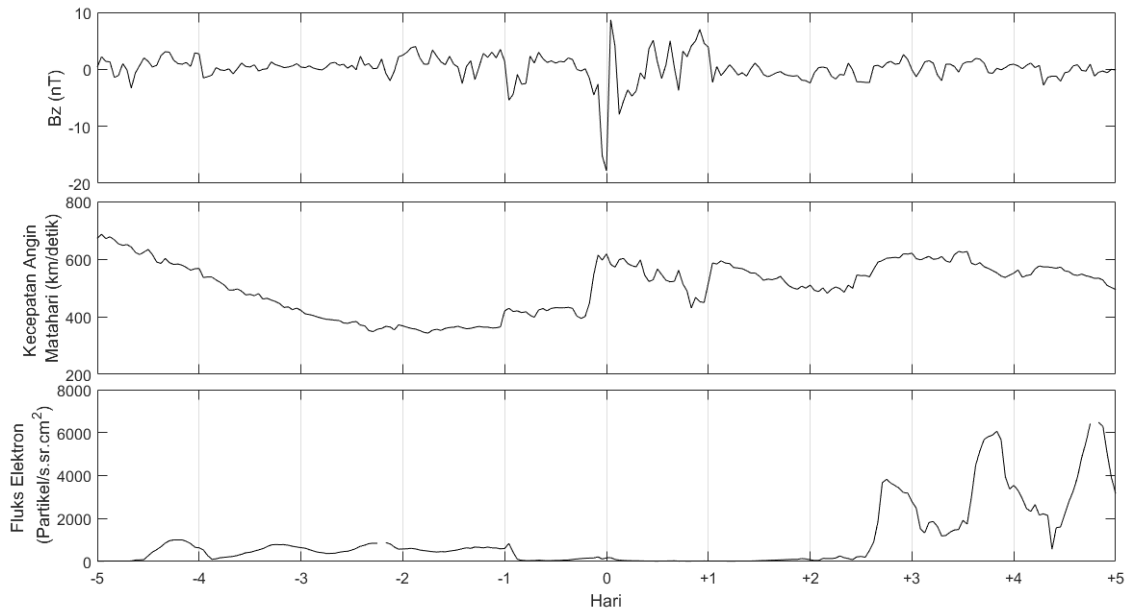
sabuk radiasi elektron bagian luar melainkan di sabuk elektron bagian dalam (Kataoka dan Miyoshi, 2006).

CIR merupakan penyebab terjadinya gangguan pada tanggal 15 Juli 2012. Seperti yang dijelaskan sebelumnya yaitu pada Gambar 3-2 (a) dan (b) dengan peningkatan fluks elektron mencapai $1,4 \times 10^4$ partikel $\text{sr}^{-1}\text{s}^{-1}\text{cm}^{-2}$, kondisi Bz pada 15 Juli 2012 pada Gambar 3-7, menunjukkan nilai negatif di -17,7 nT dan kecepatan angin matahari mendekati nilai 700 km/detik.

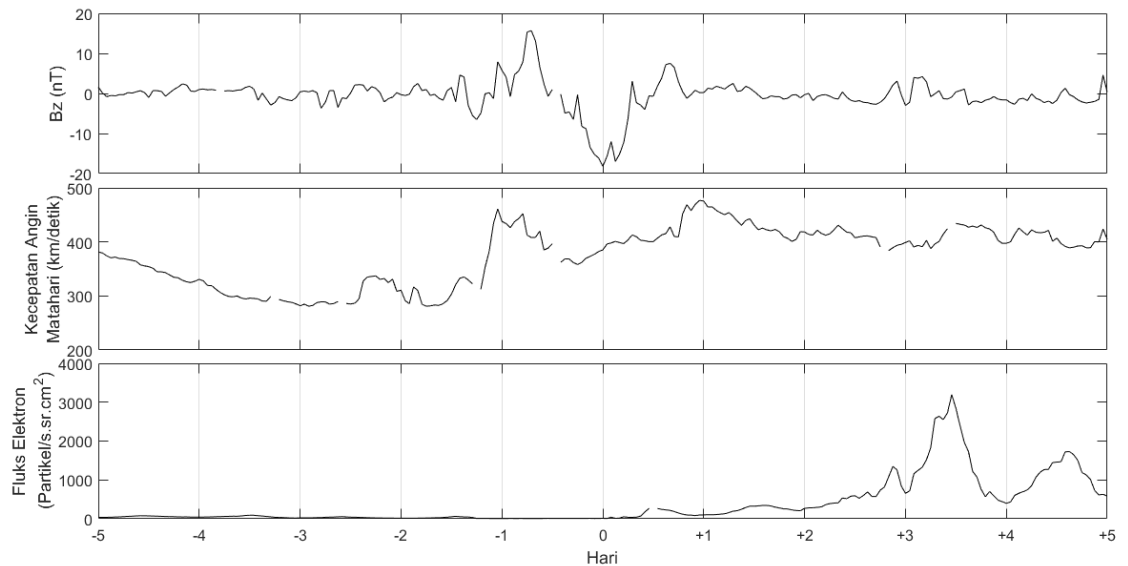
Gangguan yang terjadi pada tanggal 5 Agustus 2011 disebabkan oleh CME. Bz mencapai -17,8 nT dan kecepatan angin matahari meningkat lebih dari 600 km/detik. Perhitungan koefisien korelasi tanggal 5 Agustus 2011 antara kecepatan angin matahari dan fluks elektron menunjukkan nilai negatif yang berbeda dengan ketiga perhitungan lain. Hal ini dikarenakan sebelum tanggal 5 Agustus 2011, yaitu tanggal 31 Juli 2011 terjadi CIR yang ditandai dengan peningkatan kecepatan angin matahari hingga mencapai lebih dari 700 km/detik seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3-10.



Gambar 3-9: Kondisi Bz, Kecepatan Angin Matahari, dan Fluks Elektron Tanggal 26 September 2011



Gambar 3-10: Kondisi Bz, Kecepatan Angin Matahari, dan Fluks Elektron Tanggal 5 Agustus 2011



Gambar 3-11: Kondisi Bz, Kecepatan Angin Matahari, dan Fluks Elektron Tanggal 14 November 2012

Bz pada tanggal 14 November 2012 mencapai -18,2 nT dan kecepatan angin matahari lebih dari 450 km/detik yang disebabkan oleh beberapa CME geoeftif sejak tanggal 7 November 2012 seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3-11.

Koefisien korelasi bersifat negatif pada perhitungan fluks elektron dengan kecepatan angin matahari, yang artinya berbanding terbalik yaitu saat kecepatan angin matahari naik, maka fluks elektron akan turun dan sebaliknya.

4 KESIMPULAN

Besar peningkatan fluks elektron di sabuk radiasi elektron luar dipengaruhi oleh sumber gangguan. Sumber gangguan CIR yang dapat memicu HILDCAA memiliki peningkatan fluks elektron lebih besar dibanding dengan sumber gangguan dari CME. Fluks elektron akan meningkat saat kondisi Bz dan kecepatan angin matahari berada di kondisi normal, yaitu -5 nT hingga +5 nT dan 300 km/detik hingga 400 km/detik. Kenaikan fluks elektron terjadi pada 2-3 hari setelah Bz mengalami kondisi maksimum atau

minimum dengan besar fluks yang bergantung dari sumber gangguan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada NOAA atas ketersediaan data fluks elektron, Bz, dan kecepatan angin matahari serta kepada WDC Kyoto atas data indeks Dst dan indeks AE. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Bapak Andika Widya Pramono selaku Pembimbing di Pusbindiklat Peneliti LIPI dan Ibu Fitri Nuraeni selaku teman diskusi untuk makalah ini serta penelaah yang memberikan masukan dalam makalah ini.

DAFTAR RUJUKAN

- Allen, J. H., 2002. Historical and Recent Solar Activity and Geomagnetic Storms Affecting Spacecraft Operations. Government Microcircuit and Applications Conference, Monterey, California.
- Baker, D. N., R. D. Belian, P. R. Higbie, R. W. Klebesadel, and J. B. Blake, 1987. Deep Dielectric Charging Effects due to High-Energy Electrons in Earth's Outer Magnetosphere, *Journal of Electrostatics*, 20 (1): 3–19.
- Blake, J. B., D. N. Baker, N. Turner, K. W. Ogilive, and R. P. Lepping, 1997. Correlation of Changes in the Outer-zone Relativistic-electron Population with Upstream Solar Wind and Magnetic Field Measurements, *Geophysics Research Letter*, 24, 927–929.
- Filawati, S., dan F. Nuraeni, 2017. Pengaruh CIR dan CME Terhadap Fluks Elektron Sepanjang Tahun 2011, *Prosiding Seminar Nasional Sains Antariksa*. Bandung, 22 November 2016.
- Hajra, R., E. Echer, B. T. Tsurutani, and W. D. Gonzalez, 2013. Solar Cycle Dependence of High-Intensity Long-Duration Continuous AE Activity (HILDCAA) events, relativistic electron predictors?, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, Vol118.
- Hajra, R., B. T. Tsurutani, E. Echer, and W. D. Gonzalez, 2014. Relativistic Electron Acceleration during High-Intensity, Long-Duration, Continuous AE Activity (HILDCAA) Events: Solar Cycle Phase Dependences, *Geophysical Research Letters*, 41 (6): 1876–81.
- Heber, B., T. R. Sanderson, and M. Zhang, 1999. Corotating Interaction Regions, *Advances in Space Research*, 23 (3): 567–79.
- Iles, R., A. N. Fazakerley, A. D. Johnstone, N. P. Meredith, and P. Buhler, 2002. The Relativistic Electron Response in the Outer Radiation Belt during Magnetic Storms, *Annales Geophysicae*, no. March 2002: 957–65.
- Kataoka, R., and Y. Miyoshi, 2006. Flux Enhancement of Radiation Belt Electrons during Geomagnetic Storms Driven by Coronal Mass Ejections and Corotating Interaction Regions, *Space Weather* 4 (9):1542-7390.
- Kim, R. S., K. S. Cho, K. H. Kim, Y. D. Park, Y. J. Moon, Y. Yi, J. Lee, H. Wang, H. Song, and M. Dryer, 2008. CME Earthward Direction as an Important Geoeffectiveness Indicator, *The Astrophysical Journal*, 677 (2): 1378–84.
- Li, X., and M. A. Temerin, 2001. The Electron Radiation Belt, *Space Science Reviews*, Volume 95, 1–2, 569–580.
- Miyoshi, Y., A. Morioka, R. Kataoka, Y. Kasahara, and T. Mukai, 2007. Evolution of the Outer Radiation Belt during the November 1993 Storms Driven by Corotating Interaction Regions, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 112 (5).
- Miyoshi, Y., and R. Kataoka, 2008. Flux Enhancement of the Outer Radiation Belt Electrons after the Arrival of Stream Interaction Regions, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, Vol. 113.
- O'Brien, T. P., R. L. McPherron, D. Sornette, G. D. Reeves, R. Friedel, and H. J. Singer, 2001. Which Magnetic Storms Produce Relativistic Electrons at Geosynchronous Orbit?, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 106 (A8): 15533–44.
- Paulikas, G. A., and J. B. Blake, 1979. Effects of the Solar Wind on Magnetospheric Dynamics: Energetic Electrons at the Synchronous Orbit, *Geophys. Monogr. Ser.* 21: 180–202.
- Weigel, R. S., A. J. Klimans, and D. Vassiliadis, 2003. Precursor Analysis and Prediction of Large-amplitude Relativistic Electron Fluxes, *Space Weather Journal* (3). 1014.
- Zell, H., 2017. Earth's Magnetosphere and Plasmasheet, diakses https://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/science/magnetosphere2.html, Agustus 2017.

EFEK CME HALO PENUH PADA IONOSFER LINTANG RENDAH DARI DATA GPS BAKO DI CIBINONG [EFFECT OF FULL HALO CME ON LOW LATITUDE IONOSPHERE FROM BAKO GPS DATA IN CIBINONG]

Fakhrizal Muttaqien¹, Buldan Muslim²

¹Jurusan Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Sunan Gunung Djati,
Bandung

²Pusat Sains Antariksa, Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional
Jl. Dr. Djundjunaan 133 Bandung 40173 Indonesia
e-mail: fakhrizalm99@gmail.com

Diterima 28 Juli 2017; Direvisi 22 Januari 2018; Disetujui 22 Januari 2018

ABSTRACT

A full halo coronal mass ejections (CMEs) are most energetic solar events that eject huge amount of mass and magnetic fields into heliosphere with 360° angular angle. The full halo CME effect on the ionosphere can be determined from the ionospheric total electron content (TEC) derived from GPS data. GPS data from BAKO station in Cibinong, satellite orbital data (brcd files) and instrumental bias data (DCB files) have been used to obtain TEC using GOPI software. Analysis of the full halo CME data, Dst index, and TEC during October 2003 and February 2014 showed that the full halo CME could cause ionospheric disturbances called ionospheric storms. Magnitude and time delay of the ionospheric storms depended on the full halo CME speed. For the high-speed full halo CME, the negative ionospheric storm generally occurred during recovery phase of the geomagnetic storm. When the initial phase of geomagnetic disturbance with increasing Dst index more than +30 nT, the ionospheric storm occurred during main phase of geomagnetic disturbance although the main phase of geomagnetic disturbance did not reach geomagnetic storm condition.

Keywords: *Full Halo CME, geomagnetic storm, recovery phase, negative ionospheric storm*

ABSTRAK

Coronal mass ejection (CME) halo penuh merupakan peristiwa matahari berenergi tinggi, yang menyemburkan massa dan medan magnet ke heliosfer dengan sudut angular sebesar 360° . Efek CME halo penuh pada ionosfer dapat diketahui dari *Total Electron Content* (TEC). Data GPS BAKO di Cibinong, data orbit satelit (file *brcd*) dan data bias instrumental (file *DCB*) dapat digunakan untuk penentuan TEC menggunakan *software* GOPI. Analisis data CME halo penuh, indeks Dst, dan TEC selama bulan Oktober 2003 dan Februari 2014 menunjukkan bahwa CME halo penuh dapat menimbulkan gangguan ionosfer yang disebut badai ionosfer. Besar dan selang waktu badai ionosfer setelah terjadinya CME, tergantung pada kelajuan CME halo penuh. Untuk CME halo penuh berkelajuan tinggi, badai ionosfer negatif umumnya terjadi pada fase pemulihan badai geomagnet. Jika fase awal gangguan geomagnet diawali dengan peningkatan indeks Dst melebihi $+30$ nT, maka badai ionosfer dapat terjadi pada fase utama gangguan geomagnet walau gangguan geomagnet setelah fase awal tidak mencapai kondisi badai geomagnet.

Kata kunci: CME halo penuh, badai geomagnet, fase pemulihan, badai ionosfer negatif

1 PENDAHULUAN

Matahari adalah bintang yang terdekat dari Bumi yang memancarkan energi sendiri, yaitu berupa cahaya dan panas. Energi Matahari berasal dari reaksi nuklir yang terjadi di intinya (Martiningrum *et al.*, 2012). Energi hasil reaksi inti tersebut, terhantar hingga ke permukaan Matahari. Aktivitas tersebut menjadikan Matahari sebagai bintang aktif penggerak cuaca antariksa.

Sebagai penggerak cuaca antariksa, maka aktivitas maupun perubahan yang terjadi di Matahari akan berdampak juga pada kondisi yang ada di antariksa (Yatin, 2012). Di antara aktivitas Matahari yang menyebabkan gangguan lingkungan di Bumi yaitu, *flare* dan *coronal mass ejection* (CME). *Flare* maupun CME yang terjadi di permukaan Matahari merupakan peristiwa impulsif yang melepaskan radiasi gelombang elektromagnetik dalam *flare* dan partikel dalam peristiwa CME.

CME dapat didefinisikan sebagai material inti pada korona yang terlontar dari matahari, yang berbeda dengan angin surya. Dari gambar koronagrafi, CME bisa dikenali sebagai letupan terang yang bergerak menjauhi matahari (Gopalswamy, 2010). Fenomena CME teramati seperti letupan yang menyembur dari Matahari. Saat terjadi CME, sebagian

massa korona Matahari terlontar ke angkasa. Energi yang dilepaskan pada peristiwa ini sangat besar karena mengandung massa yang besar dan kecepatan yang tinggi. CME dapat sampai ke Bumi dalam waktu 1-5 hari (rata-rata 2-3 hari) (Martiningrum *et al.*, 2012). Sudut angular dalam pelontaran partikel oleh CME bervariasi, di antaranya CME halo penuh yang memiliki sudut angular sebesar 360° . Karena memiliki sudut angular sebesar 360° , maka partikel yang dilontarkan akan menyebar dari permukaan Matahari ke segala arah dipandang dari sensor pengamatan matahari SOHO. Adapun Gopalswamy (2010) telah mengelompokkan CME halo menjadi CME halo penuh dengan lebar yang terlihat (*apparent width*, *W*) sebesar 360° dan CME halo sebagian dengan *W* mulai 120 sampai kurang dari 360° .

Partikel yang terlempar dalam peristiwa CME halo penuh ini mempunyai kemungkinan besar sampai di Bumi dan menyebabkan perubahan pada sebagian lingkungan di Bumi. Dampak yang dihasilkan oleh CME ini antara lain adalah penurunan intensitas sinar kosmik (Lara *et al.*, 2005), dan munculnya badai geomagnet (Yatini *et al.*, 2009).

Badai geomagnet yang disebabkan oleh CME tersebut berasal dari partikel-partikel bermuatan, berenergi tinggi, dan

berkecepatan tinggi yang sampai di magnetosfer bumi dan atmosfer bumi bagian atas. Perubahan yang terjadi di magnetosfer bumi tersebut mempunyai kontribusi yang cukup besar pada struktur dan dinamika ionosfer (Yatini *et al.*, 2009).

Lapisan Ionosfer adalah bagian dari lapisan atas atmosfer yang berisi sejumlah elektron - elektron dan ion-ion bebas yang dapat mempengaruhi perambatan gelombang radio. Ionosfer dapat memantulkan sinyal radio pada pita HF (*High Frequency*) dengan frekuensi yang sama dengan frekuensi plasma ionosfer.

Untuk gelombang radio band L, ionosfer dapat memperlambat kecepatan grup gelombang radio sehingga menyebabkan kesalahan ionosfer pada pengukuran posisi berbasis satelit GPS (DasGupta *et al.*, 2007). Kesalahan posisi GPS tergantung pada nilai TEC. Menggunakan model ionosfer, kesalahan ionosfer dalam kondisi tenang dapat direduksi secara signifikan. Namun, pada kondisi terganggu koreksi ionosfer dengan model ionosfer bisa tidak signifikan meningkatkan akurasi posisi GPS. Gangguan Ionosfer dapat dilihat dari tingkat penyimpangan *total electron content* (TEC) dari TEC pada kondisi tenang yang bisa diwakili oleh nilai median bulanan TEC pada jam tertentu. Gangguan ionosfer terutama disebabkan oleh adanya badai matahari baik *flare* maupun CME.

Kumar dan Singh (2002) dalam makalahnya telah menyajikan efek dari *flare* sinar *x* Matahari terhadap TEC ionosfer selama siklus minimum Matahari selama tahun 2008. Mereka menggunakan nilai TEC yang diturunkan dari data GPS sehingga diperoleh kesimpulan bahwa peningkatan TEC setelah *flare* sinar X kelas C dan B selama siklus minimum tahun 2008 bukan merupakan efek *flare* itu sendiri tetapi juga ada kontribusi dari peningkatan radiasi Extreme Ultra Violet (EUV) selama *flare*, dan perubahan elektrodinamika di ionosfer setelah *flare*.

Adapun badai matahari berupa CME mempengaruhi ionosfer secara tidak langsung karena partikel-partikel berenergi tinggi dari matahari harus melewati medan magnet bumi sehingga dibelokkan arahnya ke arah kutub magnet bumi. Adanya arus partikel-partikel bermuatan tersebut dapat menimbulkan arus yang besarnya tergantung pada kecepatan dan kerapatan partikel matahari yang bersumber dari CME. Orientasi medan magnet antar planet juga menentukan sejauh mana penetrasi partikel CME ke magnetosfer bumi yang menentukan pengaruhnya pada ionosfer. Dengan proses efek CME pada ionosfer yang kompleks maka efek CME pada ionosfer sulit diprediksi baik waktu maupun gangguan ionosfer yang terjadi. Oleh karena itu, penelitian efek CME matahari masih intensif dilakukan untuk meningkatkan akurasi prediksi gangguan ionosfer untuk peringatan dini gangguan komunikasi radio dan penentuan posisi GPS yang propagasinya dipengaruhi oleh kondisi ionosfer.

Muslim (2002) meneliti respon ionosfer terhadap CME Juli 2000 menggunakan data foF2 dengan kesimpulan bahwa badai ionosfer terjadi dalam daerah yang luas dan terjadi sekitar 1,5 hari setelah CME 14 Juli 2000. Badai ionosfer di lintang rendah umumnya relatif lebih kecil dibanding badai ionosfer di lintang tengah dan tinggi.

Mendillo (2006) menjelaskan karakteristik umum badai ionosfer adalah sebagai berikut:

- a. Badai ionosfer positif pada siang hari dapat disebabkan oleh efek medan listrik fajar-senja yang digerakkan oleh konveksi magnetosfer,
- b. Badai ionosfer positif siang hari juga bisa disebabkan oleh dorongan angin netral yang menimbulkan peningkatan medan listrik arah ke timur pada siang hari,
- c. Badai ionosfer positif pada malam hari bisa disebabkan oleh peningkatan *drift*

plasma ke arah kutub yang diinduksi oleh presipitasi aurora.

- d. Adapun badai ionosfer negatif siang hari dapat disebabkan oleh konveksi partikel setelah matahari terbit dan deplesi komposisi partikel berumur panjang,
- e. Badai ionosfer negatif malam hari bisa juga disebabkan oleh peningkatan medan listrik arah barat pada malam hari setelah efek (1) berakhir pada malam hari.

CME pada saat medan magnet antar planet arahnya ke selatan, dapat menimbulkan badai magnetik melalui proses rekoneksi magnetik sehingga dapat mempengaruhi ionosfer ekuator dan lintang tengah pada siang hari dan tengah malam. Konveksi angin matahari dari medan magnet arah selatan melewati magnetosfer merepresentasikan medan listrik interplanet fajar-senja. Jika sebagian dari medan listrik tersebut memasuki sistem magnetosfer/ionosfer (melalui proses rekoneksi magnetik atau proses lainnya), medan listrik akan mengangkat ionosfer ekuator pada siang hari dan menekannya pada malam hari. Di daerah ekuator pada siang hari, ionosfer diangkat ke tempat yang lebih tinggi di mana rentang waktu rekombinasi lebih panjang. Ionisasi ionosfer menambah partikel-partikel ionosfer baru di daerah lintang rendah sehingga meningkatkan TEC ionosfer. Ini disebut badai ionosfer positif. Pengendalian medan magnet antar planet pada ionosfer pada siang hari disebut *day sode superfountain ionosphere* (DIS). Pada malam hari, medan listrik $E \times B$ menekan ionosfer untuk menurunkan ketinggian di mana rekombinasi kimia terjadi, mengurangi TEC ionosfer. Ini disebut badai ionosfer negatif (Tsurutani, 2009).

Farid *et al.*, (2015) mendapatkan korelasi nilai maksimum bulanan foF2 dengan rata-rata bulanan energi massa dan kelajuan CME sebesar 74%, 52% dan 65% masing-masing. Hal itu menunjukkan bahwa CME yang berenergi tinggi, masif,

dan cepat dapat mempengaruhi frekuensi kritis foF2 dengan efektif.

Menggunakan data GPS di Brasil, Fagundes *et al.* (2016) mendapat hasil penelitian bahwa di daerah *equatorial ionization anomaly* (EIA) di atas Brasil terjadi badai ionosfer positif pada fase utama badai geomagnet yang disebabkan oleh CME 15 Maret 2015 yang diikuti badai ionosfer negatif pada fase pemulihan badai geomagnet. Badai ionosfer sebagai akibat tak langsung CME menunjukkan adanya variasi longitudinal di atas Brasil.

Dari penelitian tersebut diketahui bahwa badai ionosfer negatif dari data TEC yang terjadi pada fase pemulihan badai geomagnet dapat digunakan sebagai masukan prakirawan dalam memprediksi *MUF depression* yaitu penurunan *Maximum Usable Frequency* (MUF) dari kondisi normal, yang disebabkan oleh CME yang menyebabkan badai geomagnet yaitu sekitar 2-3 hari setelah CME, dengan asumsi bahwa badai ionosfer dalam ukuran persen dari data TEC sebanding dengan badai ionosfer dari data foF2.

Pada penelitian ini digunakan data TEC GPS yang diturunkan dari data GPS BAKO yang terletak di daerah lintang rendah bagian selatan di Indonesia dengan tujuan untuk mengetahui efek CME halo penuh pada ionosfer di daerah lintang rendah Indonesia dan membandingkannya dengan hasil penelitian sebelumnya di lintang rendah Brasil. Jika diasumsikan bahwa *MUF depression* sebanding dengan badai ionosfer negatif pada data TEC, hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai bahan pertimbangan dalam prediksi *MUF depression* yang disebabkan oleh CME halo penuh.

2 DATA DAN METODOLOGI

2.1 Data CME Halo

Untuk mengetahui efek CME halo penuh terhadap TEC Ionosfer dilakukan analisis perubahan TEC selama Oktober 2003 dan Februari 2014 yang digunakan untuk mewakili tingkat aktivitas matahari tinggi siklus 23 dan 24. Pemilihan data CME bulan Oktober 2003 dan Februari

2014 karena pada bulan-bulan tersebut sering terjadi CME halo penuh. Pada bulan Oktober 2003 telah terjadi CME halo penuh sebanyak empat kali dan pada Februari 2014 telah terjadi CME halo penuh sebanyak 13 kali.

Data CME diperoleh dari SOHO LASCO CME Catalog di https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/. SOHO dan LASCO merupakan instrumen yang dimiliki NASA untuk mengamati CME. SOHO dan LASCO menyediakan data dan juga citra dari CME. Selama Oktober 2003 dan bulan Februari 2014 terjadi beberapa peristiwa CME halo penuh dengan kelajuan yang bervariasi. Seperti yang ditampilkan pada Tabel 2-1 dan Tabel 2-2.

Tabel 2-1: CME HALO PENUH OKTOBER 2003 (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/UNIVERSAL/2003_10/univ2003_10.html, Akses 5 Juli 2017)

No	Tanggal	Waktu (UT)	Laju (km/s)
1	18/10/2003	15:30:21	627
2	21/10/2003	3:54:05	1484
3	28/10/2003	11:30:05	2459
4	29/10/2003	20:54:05	2029

Tabel 2-2: CME halo penuh Februari 2014 (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/UNIVERSAL/2014_02/univ2014_02.html, Akses 5 Juli 2017)

No	Tanggal	Waktu (UT)	Laju (km/s)
1	2/2/2014	16:00:06	908
2	10/2/2014	21:36:06	557
3	12/2/2014	6:00:05	373
4	12/2/2014	16:36:05	533
5	12/2/2014	23:06:13	872
6	14/2/2014	8:48:26	1165
7	16/2/2014	10:00:05	634
8	18/2/2014	1:36:21	779
9	19/2/2014	4:48:05	612
10	20/2/2014	3:12:09	993

11	20/2/2014	8:00:07	948
12	21/2/2014	16:00:05	1252
13	25/2/2014	1:25:50	2147

2.2 Data TEC GPS

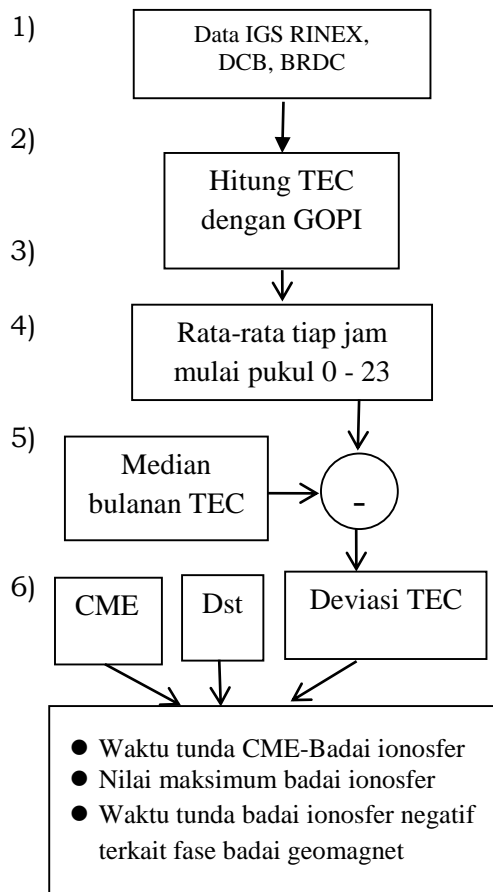
Data TEC Ionosfer dapat diturunkan dari data GPS yang terdiri dari data pengamatan jarak satelit (*pseudorange code*) dan jumlah siklus fase gelombang pembawa sinyal GPS (*carrier phase*). Data GPS stasiun BAKO di Cibinong dapat diunduh dari <http://sopac.ucsd.edu/>. Selain itu, data *Differential Code Bias* (DCB) yaitu bias instrumental satelit dan receiver GPS, data orbit satelit juga diperlukan untuk kalibrasi nilai TEC yang diturunkan dari data GPS. Nilai *Differential Code Bias* (DCB) dapat diunduh dari <ftp://ftp.aiub.unibe.ch>,

2.3 Metodologi

Metodologi penelitian ini dijelaskan dengan Gambar 2-1. Data GPS yang diperlukan terdiri dari data pengamatan GPS format rinex, data orbit dari file brdc, data bias satelit dan receiver yang terdapat dalam file DCB (langkah 1). Menggunakan *software* GOPI, data GPS tersebut diolah untuk mendapatkan data turunan berupa TEC, *Ionospheric Pierce Point* (IPP) dll. (langkah 2). Data TEC keluaran GOPI dengan sudut elevasi minimum 20° yang terdapat pada data dengan *file* berekstensi std, dirata-ratakan setiap jam mulai pukul 0:00 - 23:00 UT (langkah 3). Data median bulanan TEC dihitung dari data rata-rata jaman TEC (langkah 4). Pengurangan data TEC rata-rata jaman dengan data TEC median bulannya menghasilkan deviasi TEC yang merupakan indikator gangguan ionosfer (langkah 5). Data deviasi TEC, data CME, dan indeks Dst dianalisis untuk mendapatkan waktu tunda gangguan ionosfer, besar gangguan yaitu nilai mutlak deviasi TEC maksimum dan waktu badai ionosfer negatif terkait fase badai geomagnet (langkah 6).

Waktu tunda gangguan ionosfer dihitung dari awal terjadinya CME dan

awal terjadinya gangguan ionosfer, bukan saat gangguan mencapai maksimum atau minimum. Besar gangguan ionosfer, dihitung dari deviasi TEC terbesar yang nilainya bisa positif atau negatif.



Gambar 2-1: Penentuan badai ionosfer akibat CME halo penuh

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

CME halo penuh yang terjadi pada siklus ke-23 selama Oktober 2003 dan siklus ke-24 selama Februari 2014 memiliki kelajuan yang bervariasi. Dengan demikian, dampaknya pada ionosfer juga bervariasi dalam orde beberapa hari. Maka untuk mengetahui dampak dari CME tersebut terhadap ionosfer, diplot grafik dalam rentang waktu 10 hari.

3.1 Efek CME halo penuh pada bulan Oktober 2003.

Pada 11-20 Oktober 2003, tercatat ada satu CME halo penuh yang terjadi, tetapi dengan kelajuan yang rendah. CME halo penuh tersebut terjadi pada 18

Oktober 2003, pukul 15:30:21 UT dengan kelajuan 627 km/s (Gambar 3-1 bagian atas). CME tersebut tidak menunjukkan gangguan pada nilai TEC setelah terjadi CME. Perubahan nilai TEC yang cukup ekstrem, terjadi pada tanggal 15 Oktober 2003, sebelum terjadinya CME tersebut seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3-1 bagian bawah.

Dari indeks Dst pada 14-15 Oktober 2003 menunjukkan adanya badai geomagnet seperti diperlihatkan oleh Gambar 3-1 tengah. Badai geomagnet tersebut menimbulkan badai ionosfer positif pada tanggal 15 Oktober 2003 dengan peningkatan TEC mencapai 34,58 TECU pada pukul 01:00 UT sebagaimana dilihat pada Gambar 3-1 (bawah). Badai geomagnet tersebut bisa disebabkan oleh beberapa CME yaitu pada 10, 11 dan 13 Oktober 2003 walaupun bukan CME halo penuh sebagaimana dapat dilihat pada Tabel 3-1.

Dari Tabel 3-1 diketahui bahwa ada enam CME yang efektif mempengaruhi lingkungan bumi yaitu yang memiliki sudut posisi 283°, 233°, 283°, 262°, 305°, dan 287° yang semuanya termasuk CME yang arahnya ke Barat. Dengan terjadinya enam CME mulai 10 Oktober sampai 13 Oktober 2003 tersebut dengan laju yang bervariasi dapat menimbulkan badai geomagnet pada 14-15 Oktober 2003 yang diikuti badai ionosfer positif pada 15 Oktober 2003.

Tabel 3-1: KARAKTERISTIK CME PADA 10 - 13 OKTOBER 2003 (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/UNIVERSAL/2003_10/univ2003_10.html)

Tanggal	Waktu (UT)	PA (Derajat)	AW (Derajat)	Laju (km/s)
10/10/2003	04:54:05	284	83	698
10/10/2003	06:06:05	36	18	301
10/10/2003	11:30:05	233	62	602
10/10/2003	22:30:05	283	46	517
10/10/2003	23:06:05	190	35	273
10/11/2003	03:54:08	262	34	198
10/11/2003	09:06:19	305	38	518
10/11/2003	22:30:06	57	72	380
10/13/2003	03:54:05	65	49	362
10/13/2003	18:30:06	287	109	349

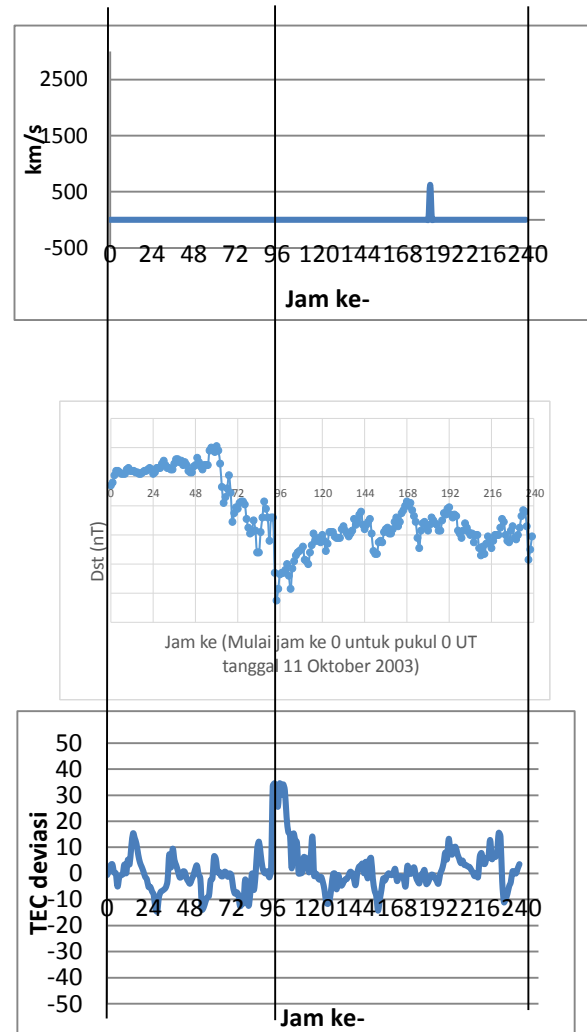
Tahun 2003 termasuk dalam fase menurun dari siklus aktivitas matahari 23. Menurut Chen *et al.* (2014) selama fase menurun dari siklus aktivitas matahari, kejadian di matahari berupa lubang corona juga dapat menimbulkan badai geomagnet yang lebih lama. Maka dari itu, badai geomagnet 14-15 juga dapat disebabkan oleh lubang korona karena terjadi dengan waktu yang relatif lebih lama sebagaimana ditunjukkan oleh Gambar 3-1, badai geomagnet terjadi selama empat hari sejak fase awal sampai fase pemulihan.

Pada 21-31 Oktober 2003 terjadi 3 CME halo penuh dengan kelajuan yang cukup tinggi. Dengan demikian, nilai TEC mengalami penyimpangan yang besar. CME halo penuh yang cukup besar terjadi pada 28 Oktober 2003, pukul 11:30:05 UT dengan laju 2459 km/s, seperti yang ditunjukkan Gambar 3-2 bagian bawah. Perubahan yang cukup ekstrem terjadi pada nilai TEC, yaitu pada tanggal 28 Oktober 2003 pukul 22:00 UT nilai TEC mulai menyimpang ke arah positif (naik), dan mencapai nilai kenaikan maksimum sebesar 43,875 TECU pada 29 Oktober 2003 pukul 09:00 UT. Kemudian TEC kembali turun pada pukul 22:00 UT hingga mengalami penurunan yang sangat signifikan. Penurunan maksimum mencapai -48,53 TECU pada pukul 08:00 UT (Gambar 3-2 bagian bawah).

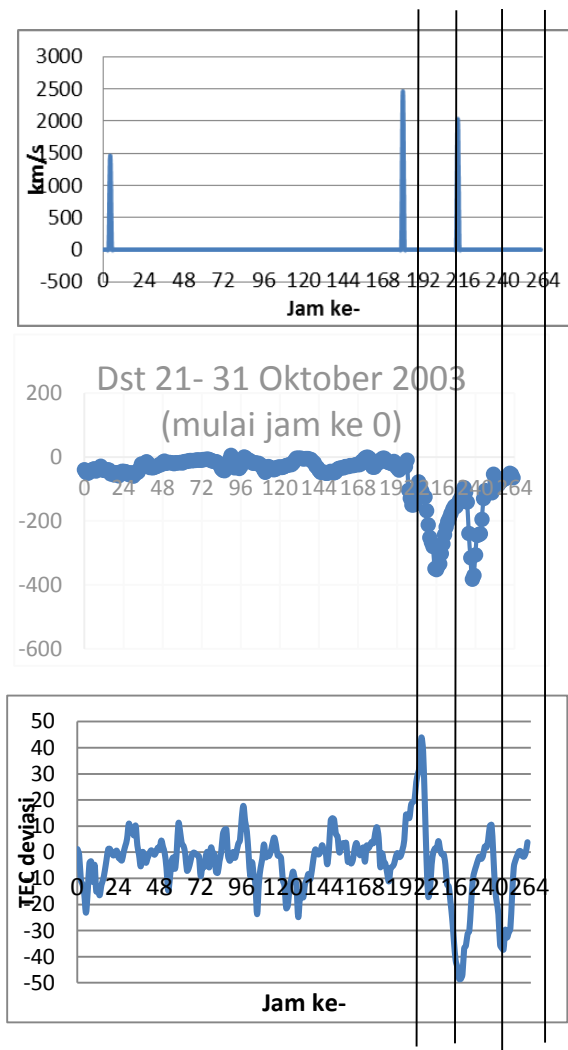
Karena laju CME halo penuh yang tinggi, maka waktu tunda yang dibutuhkan untuk mempengaruhi ionosfer sangat singkat. Dari terjadinya CME halo penuh tersebut, hanya membutuhkan waktu sekitar 11 jam untuk membuat TEC mengalami kenaikan secara signifikan, dan 31 jam untuk membuatnya turun lagi secara ekstrem.

CME halo penuh berikutnya terjadi pada keesokan harinya, yaitu tanggal 29 Oktober 2003 pada pukul 20:54:05 UT dengan laju 2029 km/s. CME tersebut menyebabkan gangguan yang cukup signifikan juga pada nilai TEC pada 31 Oktober 2003 pukul 02:00 UT dengan

nilai deviasi TEC sebesar 10,416 TECU, kemudian satu jam berikutnya TEC turun secara signifikan mencapai -0,464 TECU, hingga nilai penurunan maksimum mencapai -37,294 TECU pada pukul 09:00 UT. Waktu tunda yang dibutuhkan oleh CME tersebut hingga menimbulkan gangguan pada nilai TEC adalah 18 jam dan 27 jam hingga nilai TEC turun secara maksimum.



Gambar 3-1: Variasi nilai deviasi TEC (bawah), indeks Dst (tengah) dan CME halo penuh mulai tanggal 11 Oktober 2003 (mulai jam ke 0 pada pukul 0 UT) sampai 20 Oktober 2003 jam ke 263 pada pukul 23 UT (bagian atas)



Gambar 3-2: Variasi nilai deviasi TEC mulai (bawah), indeks Dst (tengah), dan CME mulai tanggal 21 Oktober 2003 (jam ke -0 pada pukul 0 UT) sampai 31 Oktober 2003 (jam ke-263 pada pukul 23 UT) (atas)

3.2 Efek CME halo Penuh Februari 2014 pada Ionosfer

Pada 2014 aktivitas Matahari cukup tinggi. Hal tersebut dapat terlihat dari cukup banyaknya CME yang terjadi. Begitu juga dengan peristiwa CME halo penuh yang terjadi pada Februari 2014, bahkan dalam sehari CME halo penuh bisa terjadi lebih dari satu kali. Tercatat ada 13 peristiwa CME halo penuh pada Februari 2014 dengan laju linier yang bervariasi.

CME halo penuh pada bulan Februari 2014 banyak terjadi di pertengahan bulan, yaitu antara 11-20 Februari. Tercatat ada sembilan peristiwa CME halo penuh yang terjadi, meskipun

lajunya kurang dari 1000 km/s. Hanya CME halo penuh yang terjadi pada tanggal 14 Februari 2014 saja yang lajunya mencapai 1165 km/s.

CME pada 9 dan 10 Februari 2014 tidak memberikan efek pada ionosfer pada waktu-waktu tersebut seperti diperlihatkan pada Gambar 3-3. Begitu juga beberapa hari setelahnya tidak ditemukan adanya gangguan ionosfer seperti dapat dilihat pada Gambar 3-4. Gambar 3-4 bagian atas menunjukkan terjadinya peristiwa CME halo penuh dengan laju yang bervariasi dan cenderung rendah. Hal tersebut menjadikan ionosfer tidak mengalami penurunan yang signifikan. Penurunan TEC yang signifikan hanya terjadi pada tanggal 16 Februari 2014, pukul 09:00 UT yang mencapai nilai penurunan maksimum sebesar -27,479 TECU. Penurunan nilai TEC tersebut disebabkan oleh CME halo penuh yang terjadi pada tanggal 14 Februari 2014 pukul 08:48:26 UT dengan laju 1165 km/s. Waktu tunda yang ditempuh oleh CME tersebut hingga menimbulkan gangguan pada nilai TEC adalah 48 jam atau dua hari.

Pada periode 21-28 Februari 2014, penurunan nilai TEC yang cukup signifikan terjadi pada 21 Februari 2014 dan 26 Februari 2014 (Gambar 3-5 bagian bawah). Pada 21 Februari 2014 penurunan TEC paling rendah mencapai -30.445 TECU pada pukul 09:00 UT. Penurunan nilai TEC tersebut merupakan gangguan yang disebabkan oleh dua CME halo penuh yang terjadi pada 20 Februari 2014 pukul 03:12:09 UT dan 08:00:07 UT (Gambar 3-5 bagian atas). Laju CME halo penuh tersebut masing-masing 993 km/s dan 948 km/s. Kedua CME tersebut mulai memberikan pengaruh terhadap nilai TEC berupa penurunan yang signifikan pada pukul 02:00 UT, yaitu hingga -15.33 TECU dan terus turun hingga mencapai nilai penurunan maksimum. Selang waktu yang dibutuhkan CME halo penuh hingga menimbulkan gangguan pada nilai TEC yaitu sekitar 23 jam dan untuk

mencapai nilai penurunan maksimum membutuhkan waktu sekitar 30 jam untuk CME yang pertama, dan untuk CME yang kedua selama 26 jam.

Pada 21 Februari 2014, CME halo penuh terjadi pada pukul 16:00:05 UT dengan laju 1252 km/s. CME tersebut mulai memberikan dampak berupa kenaikan nilai TEC pada 23 Februari 2014 pukul 07:00 UT sebesar 8.733 TECU, hingga mencapai kenaikan yang maksimum sebesar 21,63 TECU pada pukul 10:00 UT. Setelah itu, nilai deviasi TEC turun kembali secara signifikan hingga -7,566 TECU. Waktu tunda antara CME dengan gangguan ionosfer sekitar 40 jam.

Pada 25 Februari 2014 terjadi CME halo penuh yang cukup besar pada pukul 1:25:50 UT dengan kelajuan sebesar 2147 km/s (Gambar 3-5 bagian atas). CME tersebut berefek pada kenaikan TEC hingga mencapai 34,315 TECU pada 25 Oktober 2014 pukul 14:00. Kemudian nilai TEC turun kembali, hingga mencapai minimum pada 26 Februari 2014 pukul 08:00 UT. Penurunan tersebut mencapai nilai -21,048 TECU seperti dapat dilihat pada Gambar 3-5 bagian bawah. Selang waktu yang dibutuhkan oleh CME halo penuh tersebut untuk mulai memberikan gangguan terhadap TEC ionosfer hanya sekitar 13 jam.

Pengaruh CME pada ionosfer dari nilai deviasi TEC dapat dibedakan menjadi dua yaitu kenaikan TEC dengan deviasi TEC positif yang biasa disebut badai ionosfer positif dan penurunan TEC dengan deviasi TEC negatif yang disebut badai ionosfer negatif.

Untuk komunikasi HF, badai ionosfer positif dapat menguntungkan karena semakin lebar rentang frekuensi kerja HF di saat tersebut. Untuk badai ionosfer negatif yang terkait dengan *MUF depression* dapat dilihat dari Gambar 3-5. Ditunjukkan pada gambar tersebut bahwa puncak badai ionosfer negatif terjadi pada fase pemulihan badai geomagnet (bagian tengah Gambar 3-5).

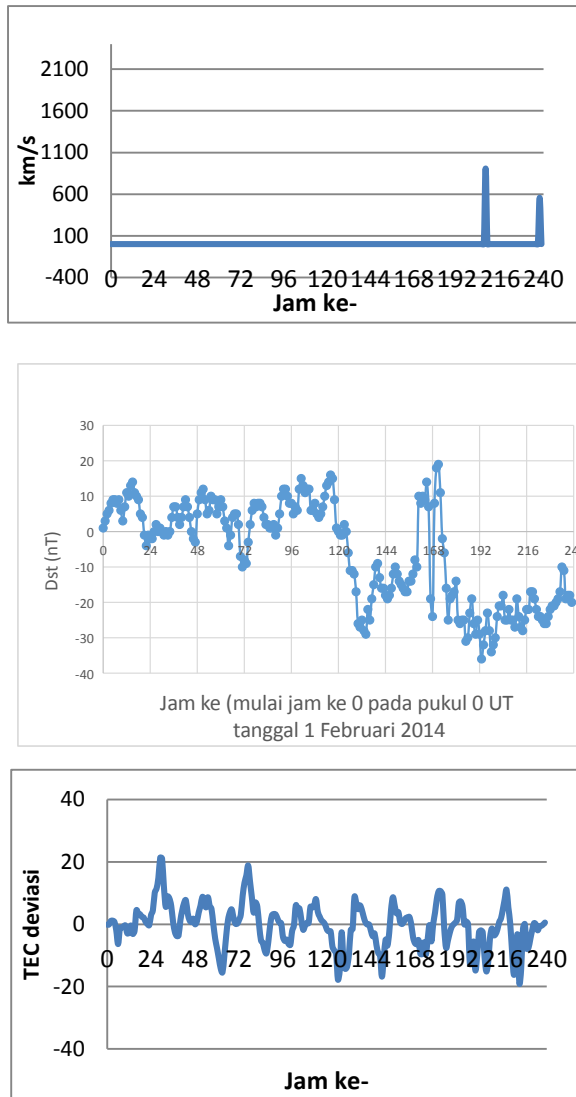
Pada badai geomagnet 29 maupun 30 Oktober mengalami fase pemulihan masing masing pada 30 dan 31 Oktober 2003. Pada fase pemulihan tersebut terjadi puncak badai ionosfer negatif terutama untuk kasus badai geomagnet besar yaitu pada 29 - 31 Oktober 2003. Terjadinya badai ionosfer negatif pada fase pemulihan badai geomagnet juga dialami pada kasus badai ionosfer pada 19 dan 20 Februari 2014. Hal ini mendukung penelitian sebelumnya oleh Fagundes *et al.* (2016) yang menyimpulkan terjadinya badai ionosfer negatif pada fase pemulihan badai geomagnet 17-18 Maret 2015. Terjadinya badai ionosfer negatif daerah lintang rendah pada fase pemulihan ini berbeda dengan badai ionosfer di lintang tengah yang pada dasarnya terjadi pada fase utama (QIU *et al.*, 2015).

Untuk badai geomagnet sedang, badai ionosfer negatif selama fase pemulihan tidak selalu konsisten. Badai ionosfer negatif juga terjadi setelah fase awal atau setelah badai geomagnet positif seperti pada kasus badai ionosfer negatif pada 16 Februari 2014. Pada kasus ini terjadi badai geomagnet positif mencapai lebih dari +47 nT. Badai geomagnet positif ini juga dikenal dengan fase awal badai geomagnet. Setelah fase awal badai geomagnet mencapai maksimum, beberapa jam kemudian terjadi badai ionosfer negatif, walaupun gangguan geomagnet tidak mencapai kondisi badai pada fase utama dengan nilai indeks Dst tidak turun melebihi -30 nT, yang merupakan nilai batas kondisi gangguan geomagnet termasuk dalam badai geomagnet lemah.

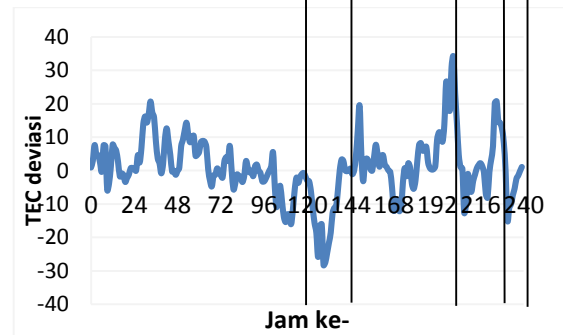
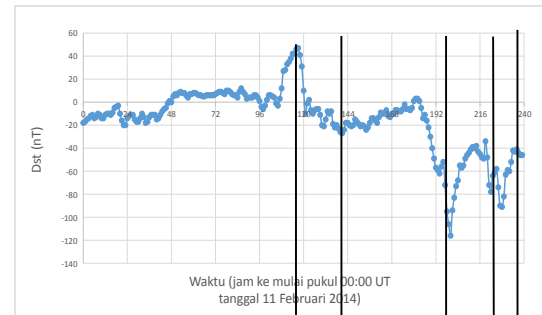
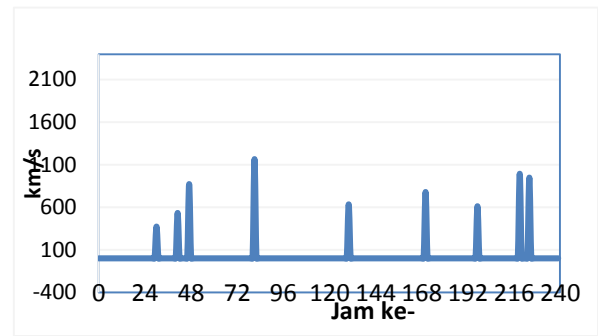
Gambar 3-6 bagian atas menunjukkan hubungan antara kelajuan CME halo penuh dengan waktu tunda yaitu selang waktu dari terjadinya hingga menimbulkan gangguan pada lapisan ionosfer. CME halo penuh pada bulan Oktober 2003 dan Februari 2014 diurutkan dari yang terkecil sampai yang terbesar. Grafik tersebut menunjukkan hubungan linier berkebalikan, artinya semakin besar kelajuan CME halo penuh

tersebut, waktu tunda yang dibutuhkan untuk menimbulkan gangguan pada TEC ionosfer semakin singkat.

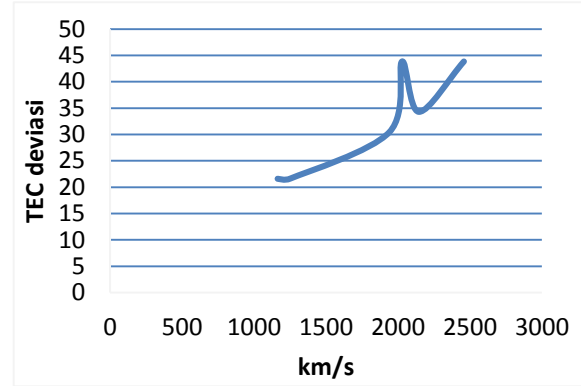
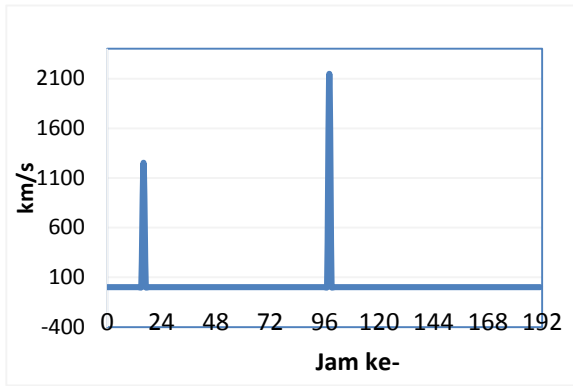
Gambar 3-6 bagian bawah menunjukkan hubungan antara kelajuan CME halo penuh dengan nilai simpangan maksimum TEC ionosfer. Dari grafik dapat terlihat bahwa semakin besar kelajuan CME Halo, nilai maksimum TEC ionosfer pun semakin meningkat.



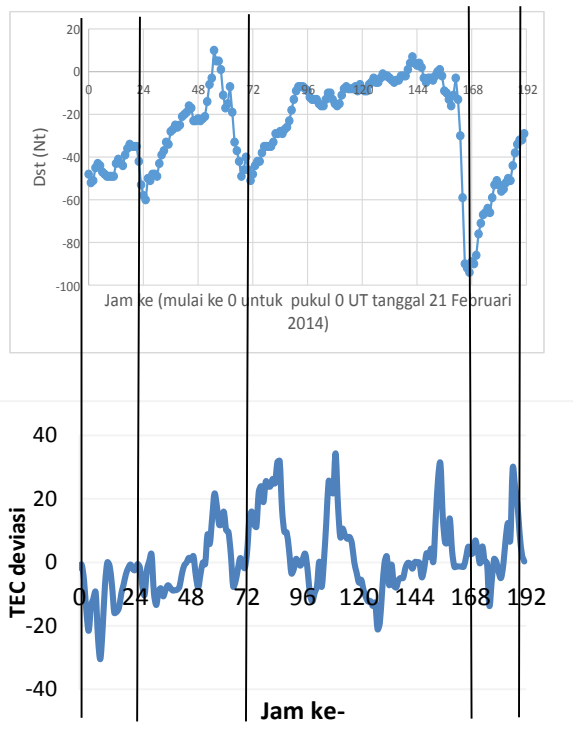
Gambar 3-3: Variasi nilai deviasi TEC (bawah), Dst (tengah), dan CME mulai 1 Februari 2014 (jam ke 0 pada pukul 0 UT) hingga 10 Februari 2014 (jam ke 239 pada pukul 23 UT)



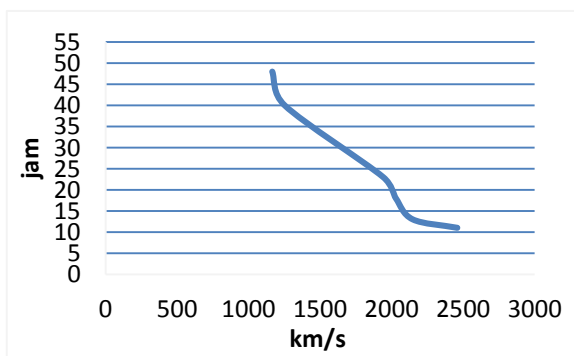
Gambar 3-4: Variasi nilai TEC deviasi mulai 11 Februari 2014 (jam ke 0) hingga 20 Februari 2014 (jam ke 240) (atas), CME Halo mulai 11 Februari 2014 (jam ke 0) hingga 20 Februari 2014 (jam ke 240) (bawah)



Gambar 3-6: Grafik hubungan kecepatan CME Halo terhadap selang waktu terjadinya gangguan pada TEC ionosfer (atas). Hubungan kecepatan CME Halo dengan nilai simpangan maksimum TEC ionosfer (bawah)



Gambar 3-5: Variasi nilai TEC deviasi mulai 21 Februari 2014 (jam ke 0) hingga 28 Februari 2014 (jam ke 240) (atas), CME Halo mulai 21 Februari 2014 (jam ke 0) hingga 28 Februari 2014 (jam ke 240) (bawah)



4 KESIMPULAN

Berdasarkan data CME halo penuh, TEC GPS dan indeks Dst pada Oktober 2003 dan Februari 2014 dapat disimpulkan bahwa CME halo penuh dengan kelajuan 2500 km/s, badai ionosfer mulai terjadi sekitar 11 jam setelah CME dengan puncak badai mencapai sekitar 45 TECU. Untuk CME halo penuh dengan kelajuan sekitar 1200 km/s, badai ionosfer mulai terjadi sekitar 48 jam setelah CME dengan besar badai ionosfer sekitar 20 TECU.

CME berkelajuan tinggi sekitar 2500 km/s, menyebabkan badai ionosfer negatif yang terjadi pada fase pemulihan. Tetapi untuk badai geomagnet yang sedang dan lemah, yang disebabkan CME halo penuh dengan kelajuan sekitar 1000 km/s, tidak selalu terjadi badai ionosfer negatif tetapi bisa kombinasi badai ionosfer positif dan negatif. Jika terjadi badai geomagnet positif (> + 30 nT) atau yang dikenal dengan fase awal badai geomagnet, maka badai ionosfer terjadi selama setelah fase awal badai geomagnet positif mencapai maksimum.

Penelitian ini selain mengkonfirmasi hasil penelitian sebelumnya oleh Fagundes *et al.* (2016) juga memberikan kontribusi tambahan bahwa badai ionosfer negatif dapat terjadi setelah badai geomagnet positif (fase awal badai geomagnet)

mencapai maksimum walau gangguan geomagnet setelahnya yaitu pada fase utama tidak sampai mencapai level badai geomagnet.

Dari penelitian ini dapat direkomendasikan bahwa jika terjadi CME halo penuh dengan laju sekitar 2500 km/s, maka dapat diprediksi akan terjadi badai ionosfer negatif beberapa hari sesudah kejadian CME. Dengan asumsi gangguan foF2 sebanding dengan gangguan pada TEC ionosfer, maka prediksi badai ionosfer negatif dari data TEC dapat digunakan sebagai bahan prediksi *MUF depression* selama fase pemulihan badai geomagnet. Penentuan waktu yang tepat kapan terjadinya *MUF depression* memerlukan informasi waktu puncak badai geomagnet.

DAFTAR RUJUKAN

- Chen, Y., W. Wang, A.G. Burns, S. Liu, J. Gong, X. Yue, G. Jiang, dan A. Coster, 2015. *Ionospheric Response to CIR-Induced Recurrent Geomagnetic Activity During the Declining Phase of Solar Cycle 23*, Journal of Geophysical Research: Space Physics, 120(2), 1394-1418.
- DasGupta, A., A. Paul, dan A. Das, 2007. *Ionospheric Total Electron Content (TEC) studies with GPS in Equatorial Region*, Indian Journal of Radio & Space Physics, 35(4), 278-292.
- Fagundes, P. R., F. A. Cardoso, B. G. Fejer, K. Venkatesh, B. A. G. Ribeiro, and V. G. Pillat, 2016. *Positive and Negative GPS-TEC Ionospheric Storm Effects During the Extreme Space Weather Event of March 2015 over the Brazilian sector*, J. Geophys. Res., 108(A4), 8019, doi:10.1029/2002JA009701.
- Farid, H. M., R. Mawad, M. Yousef and S. Yousef, 2015. *The Impacts of CMEs on the Ionospheric Critical Frequency foF2*, Elixir Space Sci. 80, 31067-31070.
- Gopalswamy, N., 2010. *Coronal Mass Ejection: a Summary of Recent Results*, Proceedings of the 20th Slovank National Solar Physics Workshop, 108-130.
- Kumar, S., & A., Singh, 2012. *Effect of Solar Flares on Ionospheric TEC at Varanasi, Near EIA Crest, during Solar Minimum Period*, Indian Journal of Radio & Space Physics, 41, 141-147.
- Lara, A., N., Gopalswamy, R., Caballero-Lopez, S., Yashiro, H., Xie, and J., Valdes-Galicia, 2005. *Coronal Mass Ejections and Galactic Cosmic Ray Modulation*, Astrophys. J., 625(1), 441-450.
- Martiningrum, D. R., A., Purwono, F., Nuraeni, dan J., Muhamad, 2012. *Fenomena Cuaca Antariksa*, Pusat Sains Antariksa, LAPAN.
- Mendillo, M., 2006. *Storms in the Ionosphere: Patterns and Processes for Total Electron Content*, Rev. Geophys., 44, RG4001, doi:10.1029/2005RG000193.
- Muslim, B., 2002. *Respon Global Ionosfer Terhadap Coronal Mass Ejection, 14 JULI 2000*, J. Fis. HFI. A5(0505).
- QIU, N., Y. -H., Chen, W. Wang, J. -C., Gong, and S. -Q., LIU, 2015. *Statistical Analysis of the Ionosphere Response to the CIR and CME in Mid-latitude regions*, Chinese Journal of Geophysics, 58, 2250-2262, doi:10.6038/cjg20150704.
- Tsurutani, B. T., O. P., Verkhoglyadova, A. J., Mannucci, G. S., Lakhina, G. Li, dan G. P., Zank, 2009, *A Brief Review of "Solar Flare Effects" on the Ionosphere*, Radio Sci., 44, RS0A17, doi:10.1029/2008RS004029.
- Yatini, C. Y., 2012. *CME Halo dan Dampaknya pada Intesitas Sinar Kosmik*, Jurnal Sains Dirgantara, 9(2), 139-146.
- Yatini, C. Y., Jiyo, dan M., Ruhimat, 2009. *Badai Matahari dan Pengaruhnya pada Ionosfer dan Geomagnet di Indonesia*, Majalah Sains dan Teknologi Dirgantara, 4(1), 17-24.

Pedoman Penulisan Jurnal Sains Dirgantara)
JUDUL MAKALAH DITULIS DENGAN HURUF KAPITAL TEBAL
SECARA SINGKAT DAN JELAS, (Studi Kasus : apabila ada)
(16 pt, Britannic Bold)
Judul dibuat dalam 2 bahasa (Indonesia dan Inggris), apabila
tulisan dalam bahasa Indonesia, maka judul dalam bahasa
Inggris ditulis dalam tanda kurung
(16 pt, Britannic Bold)

Penulis Pertama¹, Penulis Kedua², dstⁿ ← (Nama Penulis Tanpa gelar)
(10,5 pt, Franklin Gothic Medium, bold)

¹Instansi Penulis Pertama
²Instansi Penulis Kedua
dstⁿ....
(10,5 pt, Franklin Gothic Medium)

e-mail: e-mail penulis pertama ← (berwarna hitam)
(10,5 pt, Franklin Gothic Medium)

Diterima : (tanggal bulan tahun); Disetujui : (tanggal bulan tahun); Diterbitkan : (tanggal bulan tahun)
(9 pt, Franklin Gothic Medium)

ABSTRACT
(10,5 pt, Bookman Old Style, bold)

Abstract is a summary of the most important elements of the paper, written in one paragraph in the one column of a maximum of 200 words. Abstract made in two languages written with the Bookman Old Style 9 pt. If the paper written in Indonesian, the Indonesian abstract written first then followed by English abstract and vice versa. The title "ABSTRAK" or "ABSTRACT" made with uppercase letters, and bold.

Keywords: *guidence, author, journal* ← (minimal 3 keywords)
(9pt, Bookman Old Style, italic)

ABSTRAK
(10,5 pt, Bookman Old Style, bold)

Abstrak merupakan ringkasan elemen-elemen terpenting dari naskah, ditulis dalam satu paragraf dalam 1 kolom maksimal 200 kata. Abstrak dibuat dalam 2 bahasa ditulis dengan huruf 9 pt, Bookman Old Style. Apabila naskah dalam Bahasa Indonesia, maka abstrak dengan Bahasa Indonesia ditulis terlebih dahulu dilanjutkan abstrak Bahasa Inggris dan sebaliknya. Judul "ABSTRAK" atau "ABSTRACT" dibuat dengan huruf besar, *bold*.

Kata kunci: *panduan, penulis, jurnal* ← (minimal 3 kata kunci)
(9pt, Bookman Old Style, italic)

1 PENDAHULUAN
(10,5pt, Bookman Old Style, bold)

Naskah dapat ditulis dalam Bahasa Indonesia maupun Bahasa Inggris. Naskah diketik dalam Microsoft Word dengan 1 kolom untuk abstrak dan 2 kolom untuk isi. Ukuran kertas A4

dengan ukuran panjang (*height*) 29,7 cm, lebar (*width*) 21 cm dengan dimensi
Top 3 cm, *Bottom* 2,5 cm, *Inside* 2,5 cm, *Outside* 2 cm, *Gutter* 1 cm, *Header* 1 cm dan *Footer* 1 cm. Jenis Huruf Bookman Old Style 10,5 pt, dan spasi (*line spacing*) 1. Panjang naskah tidak

melebihi 10 halaman termasuk tabel dan gambar.

Kerangka Tulisan disusun dengan urutan : Judul, Identitas Penulis, Abstrak, Kata Kunci, Pendahuluan, Metode, Hasil Pembahasan, Kesimpulan, Ucapan Terimakasih, dan Daftar Pustaka.

2 METODOLOGI

(10,5pt, Bookman Old Style, bold)

Menguraikan tentang metode yang digunakan dalam penelitian termasuk data, peralatan, teori, diagram alir, beserta lokasi penelitian.

2.1 Lokasi dan Data

(10,5pt, Bookman Old Style, bold)

2.2 Standarisasi data

(10,5pt, Bookman Old Style, bold)

2.3 Metode Penelitian

(10,5pt, Bookman Old Style, bold)

Persamaan matematis atau formula diberi nomor secara berurutan yang diletakkan di ujung kanan dalam tanda kurung. Apabila penulisan persamaan lebih dari satu baris maka penulisan nomor diletakkan pada baris terakhir. Penggunaan huruf sebagai simbol matematis dalam naskah ditulis dengan huruf miring (*Italic*) seperti x . Penjelasan persamaan diulas dalam naskah. Penurunan persamaan matematis atau formula tidak perlu dituliskan secara detil, cukup diberikan bagian yang terpenting, metode yang digunakan dan hasilnya.

$$D(t) = \Delta H(t) - Sq(t, m) \quad (1-1)$$

dengan $D(t)$ tingkat gangguan geomagnet, $\Delta H(t)$ variasi medan magnet komponen horizontal, $Sq(t, m)$ variasi harian pada waktu t dan bulan m .

3 HASIL PEMBAHASAN

(10,5pt, Bookman Old Style, bold)

Tabel dibuat ringkas dan diberi judul yang singkat tetapi jelas hanya menyajikan data yang esensial dan mudah di-

pahami. Tabel diberi catatan secukupnya, termasuk sumbernya, sehingga tabel mampu menjelaskan informasi yang disajikan secara mandiri. Setiap tabel diberi nomor secara berurutan dan diulas di dalam naskah. Judul tabel diketik dengan jenis huruf Bookman Old Style 10,5 pt dan pada tulisan "Tabel 1:" "Tabel 2:" dan seterusnya diketik tebal.

Tabel yang ukurannya melebihi satu kolom, maka dapat menempati area dua kolom. Tabel tidak boleh dalam bentuk "picture", harus dalam bentuk tabel. Judul tabel dituliskan pada bagian atas tabel, rata tengah dan diberi tanda titik (.) pada akhir judul tabel.

Gambar, Grafik dan Foto harus tajam dan jelas agar cetakan berkualitas baik. Semua simbol di dalamnya harus dijelaskan. Seperti halnya tabel, keterangan pada gambar, grafik atau foto harus mencukupi agar tersaji secara mandiri. Gambar, grafik dan foto harus diulas di dalam naskah. Seperti halnya tabel, gambar, grafik dan foto yang ukurannya melebihi satu kolom, maka dapat menempati area dua kolom. Gambar, grafik dan foto memiliki kedalaman minimal 300 dpi.



Gambar 3-1: Domain model yang digunakan dalam simulasi
(9pt, Bookman Old Style)

Tabel 3-1: ANALISIS ENERGI GANGGUAN GEOMAGNET
(9pt, Bookman Old Style)

Tanggal	Bz (nT)	v (km/s)	N (/cm ³)	LO (RE)	(x10 ε11J)	Em (mV/m)	Dst* (nT)	Q (nT/jam)
1	-4,3	670	3,2	9,4	3,1	2,4	-37	14,8
2	-13,8	352	4,6	8,9	21,2	4,8	-73	21,4
3	-0,5	349	2,7	12,3	0,42	0,49	-2	2,9

4 KESIMPULAN

Hal-hal penting dalam naskah yang merupakan kesimpulan dari hasil penelitian atau kajian.

UCAPAN TERIMAKASIH

Wajib dituliskan penulis, ditujukan kepada pihak-pihak yang membantu penulis baik penyediaan data, pengerjaan data, serta Tim Redaksi Jurnal Geomatika dan Mitra Bestari.

DAFTAR RUJUKAN

Referensi hendaknya dari sumber yang jelas dan terpercaya. Setiap referensi yang tercantum dalam daftar pustaka harus dikutip (disitir) pada naskah dan sebaliknya setiap kutipan harus tercantum dalam daftar pustaka. Penulisan acuan dalam pembahasan sebaiknya menggunakan "sistem penulis-tahun" yang mengacu pada karya pada daftar pustaka. Kutipan buku dalam bentuk saduran untuk satu sampai dua penulis ditulis nama akhir penulis dan tahun. Contoh: Muhammad Nasir dituliskan (Nasir, 2009).

Referensi primer lebih dari 80 % dan diterbitkan dalam 5-10 tahun terakhir. Referensi yang dicantumkan dalam naskah mengikuti pola baku dengan disusun menurut abjad berdasarkan nama (keluarga) penulis pertama dan tahun publikasi, dengan sistim sitasi *American Physiological Association 6th Edition* dan menggunakan aplikasi *Mendeley*. Contoh penulisan di dalam Daftar Pustaka adalah sebagai berikut :

Artikel dalam Jurnal (Jurnal Primer)

Burton R. K., R. I. McPherron, C. T. Russell, 1975. *An Empirical Relationship Between Interplanetary Conditions and Dst*, J. Geophys. Res., 80(31), 4204-4214.

Buku

Ross, S. M., 2004. *Introduction to Probability and Statistics for Engineers and Scientists*, Burlington, Elsevier.

Artikel bagian dari Buku

Maris, G.; M.D. Popescu dan M. Mierla, 2004. *Soft X-Ray Solar Flarecycles*, dalam A.V. Stepanov; E.E. Benevolenskaya dan A.G.Kosovichev (editor), *Proceedings IAU Symposium*, no. 223, 73.

Skripsi/Tesis/Disertasi

Ameldam, P., 2012. *Pengujian Data NCEP-FNL Dan CCMP Untuk Potensi Energi Angin (Studi Kasus Di Jawa Barat)*, Skripsi ITB.

Naskah Prosiding

Avia, L. Q., A. Haryanto, N. Cholianawati dan B. Siswanto, 2010. *Identifikasi Awal Musim Kemarau dan Musim Hujan Berdasarkan Data Satelit TRMM*, Prosiding Seminar Penerbangan dan Antariksa 2010: Sub Seminar Sains Atmosfer dan Iklim. Serpong, 15 Nopember 2010.

Naskah Konferensi

Pontes, M-T, Sempreviva, AM, Barthelmie, R., Giebel, G., Costa, P., 2007. *Integrating Offshore Wind And Wave Resource Assessment*, Proc. 7th European Wave and Tidal Energy Conference, Porto, Portugal.

Naskah Laporan Hasil Penelitian

P3TKEBTKE-Kementerian ESDM, 2008. *Laporan Penelitian Kajian PLT Angin di Indonesia Bagian Timur*.

Naskah Online

Habby, J., 2011. *Applying Tropospheric Moisture to Forecasting, Meteorology Education*, diakses [http:// weatherprediction.com](http://weatherprediction.com), 23 Desember 2014

**PEDOMAN BAGI PENULIS
JURNAL SAINS DIRGANTARA
(*Journal of Aerospace Sciences*)**

Jurnal Sains Dirgantara (*Journal of Aerospace Sciences*) adalah jurnal ilmiah untuk publikasi penelitian dan pengembangan di bidang sains atmosfer dan sains antariksa.

Penulis diundang untuk mengirimkan naskah atau karya asli hasil penelitian, pengembangan, dan atau pemikiran yang belum dipublikasikan atau dikirimkan ke media publikasi manapun. Penulis boleh mengusulkan penelaah ahli di luar Dewan Penyunting, yang dianggap memahami betul substansi naskah yang dikirim. Naskah yang dikirim akan dievaluasi secara anonim oleh dua atau tiga penelaah ahli dan/atau Dewan Penyunting dari segi keaslian (orisinalitas), kesahihan (validitas) ilmiah, dan kejelasan pemaparan. Penulis berhak menanggapi hasil evaluasi, sedangkan Dewan Penyunting berhak menerima atau menolak serta menyempurnakan naskah tanpa mengurangi isi/maknanya. Naskah yang tidak dimuat, dikembalikan kepada penulis dengan alasan penolakannya. Penulis yang naskahnya dimuat mendapat 3 (tiga) eksemplar dari nomor yang diterbitkan, dan naskah yang ditulis kolektif, hanya diberikan 2 (dua) eksemplar untuk masing-masing penulis. Ketentuan bagi penulis pada jurnal ini adalah sebagai berikut.

a. Pengiriman naskah

Naskah dikirim dan diunggah melalui laman www.jurnal.lapan.go.id/jurnal_sains/. Naskah diketik dengan MS Word dengan Bookman Old Style font 10.5pt pada kertas A4 dengan spasi ganda. Khusus untuk judul naskah ditulis huruf besar dengan font 16 pt. Penulis yang naskahnya diterima untuk dipublikasikan, diminta menyerahkan file dalam cd, atau dikirim melalui e-mail ke Sekretariat Dewan Penyunting (pukasi.lapan@gmail.com; publikasi.lapan@gmail.com)

b. Sistematika penulisan

Judul harus ringkas tanpa singkatan dalam bahasa Indonesia dan bahasa Inggris. Informasi penulis terdiri dari nama (para) penulis tanpa gelar, instansi/ perguruan tinggi, dan e-mail penulis utama. Isi makalah terdiri dari: (a) abstrak dalam bahasa Indonesia dan bahasa Inggris maksimum 200 kata yang tersusun dalam satu alinea, (b) kata kunci, (c) batang tubuh naskah terdiri dari Pendahuluan, Data/Metode/Teori, Hasil dan Pembahasan, Implementasi (jika ada), serta Kesimpulan, (d) Ucapan terimakasih (bila perlu) yang lazim, dan (e) Daftar rujukan.

c. Gambar dan Tabel

Gambar atau foto harus dapat direproduksi dengan tajam dan jelas. Gambar atau foto warna hanya diterima dengan pertimbangan khusus. Gambar dan tabel dapat dimasukkan ke dalam batang tubuh atau dalam lampiran tersendiri. Untuk kejelasan penempatan dalam jurnal, gambar dan tabel harus diberi nomor sesuai nomor bab dan nomor urut pada bab tersebut, misalnya Gambar 2-2 atau Tabel 2-1 yang disertai keterangan singkat gambar dan judul dari tabel yang bersangkutan.

d. Persamaan, Satuan, dan Data Numerik

Persamaan diketik atau ditulis tangan (untuk simbol khusus) dan diberi nomor di sebelah kanannya sesuai nomor bab dan nomor urutnya, misalnya persamaan (1-2). Satuan yang digunakan adalah satuan internasional (CGS atau MKS) atau yang lazim pada cabang ilmunya. Karena terbit dengan dua bahasa, angka desimal data numerik pada tabel dan gambar harus mengacu pada sistem internasional dengan menggunakan titik, sedangkan pada naskah tetap menggunakan ketentuan menurut bahasanya.

e. Rujukan

- PP No. 74, 2001. Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 18 Tahun 1999 Tentang: *Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun*. Kementerian Lingkungan Hidup. Jakarta.
- Haryani, N. S., Hidayat, Sulma, S., dan Pasaribu, J. M., 2014. *Deteksi Limbah Acid Sludge Menggunakan Metode Red Edge Berbasis Data Penginderaan Jauh*, Jurnal Penginderaan Jauh dan Pengolahan data Citra Digital, Vol 11 No.2 Desember 2014.
- Center for International Forestry Research [CIFOR], 2012. *Forests and Climate Change Mitigation : What Policymakers Should Know*, Fact Sheet. No. 5, November 2012, MITIGATION, Key of Research Findings. CGIAR Research Programme.
- The National Geophysical Data Center (NOAA)-NASA. Sumber data VNF, 2014. Sumber: http://ngdc.noaa.gov/eog/viirs/download_2014_indonesia.html atau (Sumber LAPAN: <http://modis-catalog.lapan.go.id/monitoring/katalognpp#>).
- http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/data_prod/prog_sect11_3.html